

**Titre:** Contribution à l'exploitation robuste des réseaux électriques par la  
Title: méthode de Taguchi

**Auteur:** M'Hamed Bounou  
Author:

**Date:** 1997

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Bounou, M. (1997). Contribution à l'exploitation robuste des réseaux électriques  
Citation: par la méthode de Taguchi [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal].  
PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8952/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/8952/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:**  
Advisors:

**Programme:** Non spécifié  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONTRIBUTION À L'EXPLOITATION ROBUSTE  
DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES  
PAR LA MÉTHODE DE TAGUCHI

MHAMED BOUNOU

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)  
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

JANVIER 1997

@ Mhamed Bounou, 1997.



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*

*Our file* *Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26414-9

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse est intitulée:

CONTRIBUTION À L'EXPLOITATION ROBUSTE DES  
RÉSEAUX ÉLECTRIQUES PAR LA MÉTHODE DE TAGUCHI

présentée par: BOUNOU Mhamed

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. MARCEAU Richard J., Ph.D., président

M. DO Xuan-Dai, D.Sc.A., directeur de recherche

M. LEFEBVRE Serge, Ph.D., membre et co-directeur

M. LAGACÉ Pierre-Jean, Ph.D., membre

M. GABA Georges, Ph.D., examinateur externe

## **REMERCIEMENTS**

Cette thèse n'aurait pu être menée à terme sans l'appui de mes directeurs de recherche. Ainsi je tiens à remercier mon directeur le Docteur Xuan-Dai Do qui n'a pas cessé de m'encourager le long de mon parcours. L'aide et les supports matériels qu'il a mis à ma disposition ont été fondamentaux pour le développement de ce travail.

Que mon codirecteur le Docteur Serge Lefebvre trouve dans mes remerciements, mes sentiments profonds de considération et de reconnaissance pour ses conseils scientifiques, son aide matérielle et son soutien moral dont j'avais énormément besoin.

Le Docteur Georges Gaba et les collègues de l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec qui m'ont fait bénéficier de leurs expériences.

Les professeurs Bozena Kaminska et Bernard Clément pour leurs conseils scientifiques.

Les professeurs de la section Électrotechnique pour leur sympathie.

La secrétaire Danielle Therrien pour ses services et Jacques Girardin pour ses supports techniques.

Les personnes que j'ai eu le plaisir de connaître à l'École Polytechnique.

Que tous soient sincèrement remerciés.

## RÉSUMÉ

Les algorithmes utilisés actuellement dans l'exploitation des réseaux et en particulier ceux qui optimisent une certaine performance (algorithmes de répartition optimale de puissance ou algorithmes de conception des stabilisateurs ) sont rapides et performants numériquement mais ils présentent des défaillances pratiques. La solution n'est pas toujours satisfaisante et les ajustements de la solution analytique à la solution pratique sont souvent requis. Dans la répartition optimale de puissance, les variables de contrôles comme les compensateurs shunts ou les transformateurs à prises sont arrondies à leurs paliers discrets de manière arbitraire. La même procédure est utilisée en stabilité petit signal pour adapter les stabilisateurs aux variations des paramètres du système et pour coordonner le réglage en présence des interactions entre les machines ou les sous-systèmes. Une action arbitraire sur les contrôles conduit à une dégradation des performances recherchées par les algorithmes et entraîne des violations de contraintes. Un algorithme qui traite rigoureusement les variables continues, discrètes et une certaine robustesse aux variations des paramètres demande des outils mathématiques sophistiqués. Il est nécessairement complexe, lent et il devient inutilisable en pratique. Le meilleur compromis est de développer une logique ou une procédure permettant à l'utilisateur d'ajuster la solution des algorithmes standards (algorithmes qui ne traitent pas les variables discrètes ou stochastiques) d'une manière optimale pour qu'elle soit acceptable en pratique.

Dans ce mémoire nous remédions aux problèmes des défaillances pratiques des algorithmes par une approche qualitative.

Le but général de la procédure est d'obtenir une meilleure combinaison des facteurs de contrôle qui résulte en des performances caractéristiques des grandeurs réponses aussi proches que celles désirées incluant les variations des paramètres du système.

La fonction de désirabilité est utilisée pour représenter les performances désirées par l'utilisateur d'une manière flexible. La coordination entre plusieurs objectifs est assurée par la fonction de désirabilité globale. Les variations des paramètres du système sont incluses dans l'analyse au moyen de l'espérance mathématique qui est estimée par la méthode des tableaux orthogonaux. La position des variables de contrôle qui donne la meilleure performance à la solution est sélectionnée par le rapport signal/bruit.

La procédure proposée couple l'analyse statistique à une stratégie d'optimisation bien définie. Elle est pratique pour analyser les systèmes avec ou sans modèle mathématique en présence des variations incontrôlables des paramètres. Les tableaux orthogonaux permettent de traiter les variables discrètes comme les contrôles shunts. L'analyse de sensibilité en présence des interactions peut être effectuée. Dans la planification, la conception et le réglage des stabilisateurs l'opérateur peut sélectionner parmi les facteurs ceux qui sont efficaces. La procédure proposée peut être implantée dans les algorithmes standards comme une sous-routine qualitative. Elle peut être utilisée de manière interactive comme un utilitaire d'aide à la décision.

## **ABSTRACT**

Today, power system analysis algorithms are becoming increasingly available. However, most existing algorithms still have some deficiencies that limit their scope of application and practical value. The solution is not always satisfactory and the adjustments of the analytical solution to a practical one are often required. In OPF, variables as shunt controls are rounded off to their discrete steps and the control actions to correct constraints violations, if any, or to enforce power system in a secure operating region are made by a suboptimal procedure. The same procedure is applied in power system stability to adjust parameters of stabilizers and coordinate regulators in the presence of power system variability or interaction between machines and sub-systems. An arbitrary adjustment procedure leads to a high objective function cost and constraint violations. Fast and rigorous algorithms that handle a mix of continuous/discrete variables and power system parameter variability require sophisticated mathematical tools and are computationally complex and not attractive for real time applications. A best compromise is to develop a logic or a procedure to improve the performance of the fast standard algorithms to be acceptable for practical purposes.

Here, we use a quality control based method to improve the performances of the solution in terms of robustness and desirability. The goal is to obtain a best setting of the input which results in a performance characteristic of the output close to target with minimum variability. A post-optimality procedure which incorporates the philosophy and the method of Taguchi



is applied. Desirability functions are used to assess how close system responses are to their targets. Power system variability is included in the analysis by means of the expected value of a loss function which is estimated by Taguchi orthogonal arrays approach. The best and less sensitive solution over uncontrollable power system variability is selected by means of signal-to-noise ratios.

The procedure used here couples statistical analysis with a well-defined problem optimization solving strategy. It can be helpful in all power system problems where parameter variability is incorporated in the analysis and the exact solution or mathematical model are not available. Decision making under uncertainty or sensitivity analysis in the presence of interactions between system variables may be evaluated. Based on orthogonal arrays, the approach handles discrete variables as shunt controls. Operators in VAR planning and/or contingency analysis can quickly and efficiently select through a large number of factors those that actively affect a response variable.

## **TABLE DES MATIÈRES**

REMERCIEMENTS .....	.iii
RÉSUMÉ .....	.iv
ABSTRACT.....	.vi
TABLE DES MATIÈRES .....	.viii
LISTE DES FIGURES .....	.xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	.xvi
LISTE DES SYMBOLES.....	.xviii

### *Chapitre 1*

## **INTRODUCTION**

1.1 Généralités .....	.1
1.2 Défaillances pratiques des algorithmes . . . . .	.2
1.3 Approche qualitative. ....	.9

*Chapitre 2*

**MÉTHODE DE TAGUCHI**

2.1 Introduction .....	12
2.2 philosophie de Taguchi .....	13
2.3 Spécification des performances .....	14
2.4 Fonction pertes .....	15
2.4.1 Forme analytique .....	16
2.5 Optimisation des performances .....	17
2.5.1 Optimisation analytique .....	18
2.5.2 Variations des paramètres .....	19
2.6 Stratégie d'optimisation de Taguchi .....	22
2.7 Tableaux orthogonaux .....	26
2.7.1 Définition .....	26
2.7.2 Tableaux à deux modalités .....	28
2.7.2.1 Exemple .....	29
2.7.3 Tableaux à trois modalités .....	32
2.7.3.1 Exemple .....	33
2.8 Intérêt des tableaux orthogonaux .....	34
2.8.1 Exemple .....	34
2.9 Rapport signal-bruit .....	37
2.10 Discussion de la méthode de Taguchi .....	38

2.11 Fonction de désirabilité. ....	40
2.11.1 Définition. ....	40
2.11.2 Optimisation simultanée de plusieurs réponses ....	42

### *Chapitre 3*

## **QUALITÉ DE LA RÉPARTITION OPTIMALE**

## **PUISSANCE DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES**

3.1 Généralités .....	44
3.2 Équations de répartition de puissance. ....	46
3.3 Formulation générale .....	48
3.4 Classes d'optimisation de puissance. ....	49
3.4.1 Le dispatching économique .....	50
3.4.2 Optimisation du plan de tension. ....	51
3.5 Performances du profil de tension .....	53
3.5.1 Exemple. ....	53
3.5.2 Spécification des performances .....	55
3.5.3 Optimisation. ....	57
3.6 Optimisation des performances des pertes .....	66
3.6.1 Spécifications. ....	67

3.6.2 Optimisation .....	70
3.6.3 Validation des résultats. ....	72
3.7 Ajustements des contraintes. ....	76

## *Chapitre 4*

# **AJUSTEMENTS DES PARAMETRES D'UN STABILISATEUR ET PERFORMANCES DU RÉGLAGE**

4.1 Stabilité petit signal. ....	81
4.2 Modèle dynamique d'un réseau mono-machine .....	84
4.2.1 Réseau mono-machine .....	84
4.2.2 Couple de la machine .....	88
4.2.3 Circuit d'excitation .....	89
4.2.4 Tension de la machine .....	89
4.2.5 Équation dynamique .....	90
4.3 Stabilisateur .....	94
4.4 Performances dynamiques .....	96
4.5 Analyse des performances du stabilisateur. ....	104
4.5.1 Analyse de sensibilité. ....	104
4.6 Effets des interactions .....	109

4.7 Ajustements des paramètres. ....	110
4.8 Variations des paramètres. ....	118
4.8.1 Spécifications des performances ....	118
4.9 Réseau multimachines. ....	127
4.9.1 Analyse des performances des stabilisateurs ....	132
4.9.2 Amélioration des performances. ....	134
 <b>CONCLUSION</b> .....	139
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	146
<b>ANNEXE A</b> .....	154
<b>ANNEXE B</b> .....	156
<b>ANNEXE C</b> .....	160

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 2.1 : Diagramme bloc de contrôle de qualité. . . . .	20
Figure 2.2 : Effets des variations des facteurs sur la performance . . . . .	25
Figure 2.3 : Plans factoriels de 3 facteurs à 3 modalités. . . . .	35
Figure 2.4 : Plans fractionnels. . . . .	36
Figure 2.5 : Fonction de désirabilité. . . . .	41
Figure 3.1 : Réseau de 4 noeuds. . . . .	53
Figure 3.2 : Désirabilité du profil de tension. . . . .	56
Figure 3.3 : Désirabilité de D en fonction de $C_3$ . . . . .	61
Figure 3.4 : Désirabilité de D en fonction de $C_4$ . . . . .	61
Figure 3.5 : Réseau IEEE-30 noeuds. . . . .	67
Figure 3.6 : Réseau 23 noeuds . . . . .	77
Figure 4.1 : Diagramme bloc d'une machine synchrone avec stabilisateur . . . . .	83
Figure 4.2 : Machine synchrone reliée à un réseau infini. . . . .	84
Figure 4.3 : Grandeurs de la machine dans les axes d et q. . . . .	86
Figure 4.4 : Modèle dynamique de la machine synchrone. . . . .	93
Figure 4.5 : Stabilisateur. . . . .	95
Figure 4.6 : Angle de la machine. . . . .	99
Figure 4.7 : Tension de la machine. . . . .	100
Figure 4.8 : Tension de commande la machine. . . . .	101
Figure 4.9 : Puissance de la machine. . . . .	102

Figure 4.10: Excitation de la machine. ....	103
Figure 4.11: Effets des variations de $t_1$ sur $\delta$ ....	105
Figure 4.12: Effets des variations de $K_c$ sur $\delta$ . ....	105
Figure 4.13: Effets des variations simultanées de $t_1$ et $K_c$ . ....	107
Figure 4.14: Effet résultant. ....	108
Figure 4.15: Interactions entre $K_c$ et $t_1$ . ....	110
Figure 4.16: Effets des variations de $t_1$ pour $K_c=K_c$ . ....	111
Figure 4.17: Effets des variations de $t_1$ pour $K_c=K_c$ . ....	111
Figure 4.18: Effets des variations de $K_c$ pour $t_1=t_1$ . ....	112
Figure 4.19: Effets des variations de $K_c$ pour $t_1=t_1$ . ....	112
Figure 4.20: Angle $\delta$ pour les quatre solutions ....	114
Figure 4.21: Angle $\delta$ pour la solution initiale et améliorée. ....	115
Figure 4.22: Tension $V_1$ pour la solution initiale et améliorée. ....	116
Figure 4.23: Puissance pour la solution initiale et améliorée. ....	117
Figure 4.24: Angle $\delta$ pour un s/b minimal et maximal. ....	122
Figure 4.25: Angle $\delta$ pour la solution initiale et améliorée. ....	124
Figure 4.26: Tension $V_1$ pour la solution initiale et améliorée. ....	125
Figure 4.27: Puissance pour la solution initiale et améliorée. ....	126
Figure 4.28: Réseau 3-machines. ....	128
Figure 4.29: Vitesse des machines 1,2 et 3 (sans stabilisateurs). ....	129
Figure 4.30: vitesse de la machine #1 pour les 4 réglages. ....	130



Figure 4.31: Vitesse de la machine #2 pour les 4 réglages .....	131
Figure 4.32: Vitesse de la machine #3 pour les 4 réglages. ....	131
Figure 4.33: Désirabilité de la position des pôles. ....	132
Figure 4.34: Vitesse de la machine 1. ....	137
Figure 4.35: Vitesse de la machine 2. ....	137
Figure 4.36: Vitesse de la machine 3 .....	138
Figure 4.37: Désirabilité des 27 combinaisons $OA_{27}(3^{13})$ . ....	138

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 2.1 : Tableau orthogonal $OA_8(2^7)$ . . . . .	7
Tableau 2.2 : Coefficients générateurs pour deux modalités . . . . .	29
Tableau 2.3 : Plan factoriel complet $2^3$ pour les colonnes de base . . . . .	30
Tableau 2.4 : Coefficients générateurs de 7 colonnes à 2 modalités . . . . .	31
Tableau 2.5 : Tableau orthogonal $OA_8(2^7)$ . . . . .	31
Tableau 2.6 : Coefficients générateurs pour 3 modalités . . . . .	32
Tableau 2.7 : Plan factoriel complet $3^2$ pour les colonnes de base . . . . .	33
Tableau 2.8 : Tableau orthogonal $OA_9(3^4)$ . . . . .	33
Tableau 3.1 : Impédances des lignes . . . . .	54
Tableau 3.2 : Puissances des charges . . . . .	54
Tableau 3.3 : Tensions. . . . .	54
Tableau 3.4 : Le plan factoriel de $C_3$ et $C_4$ . . . . .	58
Tableau 3.5 : Désirabilité . . . . .	59
Tableau 3.6 : Tensions pour une désirabilité maximale . . . . .	60
Tableau 3.7 : Tableau $OA_9(3^3)$ . . . . .	63
Tableau 3.8 : Performances caractéristiques du profil de tension. . . . .	64
Tableau 3.9 : Tensions pour un s/b maximal . . . . .	65
Tableau 3.10 : Pertes actives. . . . .	66
Tableau 3.11: $OA_9(3^4)$ représentant les contrôles . . . . .	68
Tableau 3.12: $OA_{27}(3^{13})$ représentant le bruit . . . . .	69

Tableau 3.13: Performances caractéristiques des pertes . . . . .	71
Tableau 3.14: Pertes actives de la solution initiale et améliorée . . . . .	72
Tableau 3.15: Plan factoriel complet $3^4$ . . . . .	73
Tableau 3.16: Performances des pertes pour 81 combinaisons . . . . .	74
Tableau 3.17: Performances des pertes pour les trois solutions. . . . .	75
Tableau 3.18: Désirabilité et performances des pertes. . . . .	79
Tableau 3.19: Modules et phases des tensions après ajustement . . . . .	80
Tableau 4.1 : Données et conditions initiales (machine-réseau infini). . . . .	96
Tableau 4.2 : Tableau orthogonal $OA_4(2^2)$ . . . . .	106
Tableau 4.3 : Tableau orthogonal $OA_9(3^2)$ . . . . .	119
Tableau 4.4 : Tableau orthogonal $OA_8(2^7)$ . . . . .	120
Tableau 4.5 : Rapport s/b pour les différents réglages . . . . .	121
Tableau 4.6 : Pôles du système . . . . .	123
Tableau 4.7 : Paramètres des stabilisateurs . . . . .	130
Tableau 4.8 : Partie réelle des pôles . . . . .	133
Tableau 4.9 : Paramètres variables du modèle . . . . .	133
Tableau 4.10: Désirabilité des 4 solutions . . . . .	134
Tableau 4.11: Désirabilité des 27 combinaisons $OA_{27}(3^{13})$ . . . . .	135
Tableau 4.12: Paramètres des stabilisateurs . . . . .	135
Tableau 4.13: Pôles de la solution initiale et améliorée . . . . .	138

## **LISTE DES SYMBOLES**

OPF : Optimal Power Flow

PSS : Power System Stabilizer

OA : Orthogonal Array

TO : Tableau orthogonal

$y$  : grandeur caractéristique

$\tau$  : valeur spécifiée

$L$  : fonction pertes

EL : espérance mathématique de  $L$

$X$  : vecteur des facteurs de contrôle

$\Omega$  : vecteur des facteurs de bruit

$\mu$  : moyenne

$\sigma$  : variance

$\min_x$  : minimum par rapport à  $x$

s/c : sous contraintes

s/b : rapport signal/bruit

$I$  : vecteur des courants

$V$  : vecteur des tensions

$Y$  : matrice impédance

$P$  : puissance active

$\pi$  : pertes actives

$Q$  : puissance réactive

$S$  : puissance apparente

$\delta$  : angle de la machine

$\omega$  : vitesse de la machine

$\xi$  : amortissement

$V_{\text{pss}}$  : tension du stabilisateur

$U_e$  : tension de référence

*Chapitre 1***INTRODUCTION****1.1 Généralités**

L'énergie électrique se distingue par sa transformation directe en toute autre forme d'énergie, son excellent rendement et sa facilité de transport. Ces avantages sont à l'origine de la grande demande en cette énergie et du développement spectaculaire des réseaux électriques.

On distingue trois grands ensembles formant ce système énergétique: un parc de production variant avec la nature de la force motrice (thermique, hydraulique ou nucléaire), un réseau de transport constitué par des unités de transformation, de conversion et de compensation, et un parc de consommation très varié pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs. L'ensemble des éléments est relié, toutes les unités sont interconnectées par des lignes ou câbles électriques formant ainsi un système de très grande dimension.

La grandeur du système, la diversité de ses constituants, l'éloignement géographique des éléments et la nature dynamique du système sont autant de facteurs qui rendent l'exploitation assez complexe[Stott B., Alsac O., Monticelli A. J. 1987]. De grands efforts ont été déployés au cours des années pour maîtriser le fonctionnement du système, garantir

sa stabilité et enfin assurer une exploitation optimale. Ces efforts ont permis le développement d'un grand nombre d'algorithmes pour l'analyse, la conception et l'optimisation des réseaux électriques. Cependant la plupart de ces algorithmes présentent des défaillances dans l'exploitation réelle des réseaux.

## 1.2 Défaillances pratiques des algorithmes

Les algorithmes utilisés actuellement dans l'exploitation des réseaux et en particulier ceux qui optimisent une certaine performance (algorithmes de répartition optimale de puissance ou algorithmes de conception des stabilisateurs ) sont rapides et performants numériquement mais ils présentent des défaillances pratiques[Tinney W. F. 1987][Stott B., Alsac O., Monticelli A. J. 1987][Fleming P. J., Fonseca C. M. 1994 ]. La solution n'est pas toujours satisfaisante et les ajustements de la solution analytique à la solution pratique sont souvent requis.

Dans la planification par exemple, les valeurs calculées par un algorithme OPF pour les variables de contrôle comme les éléments de compensation shunts ne correspondent pas aux paliers de réglage discret[Liu W.H., Papalexopoulos A. D., Tinney W. F. 1991]. Les variables utilisées dans la résolution sont nombreuses pour être actionnées toutes en pratique.

En stabilité petit signal, les algorithmes de conception des régulateurs utilisant les techniques LQG[Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. 1989] et H-infinie[Francis B. A., Doyle J. C. 1987] sont complexes. Le régulateur conventionnel conçu pour un modèle et un point de fonctionnement donné ne peut assurer les performances requises en pratique sans l'ajustement de ses paramètres.

L'utilisateur de ces logiciels en planification ou en stabilité petit signal procède à des ajustements souvent arbitraires des variables de contrôle pour arriver à une solution acceptable. Cette pratique est généralement admise[Tinney W. F. 1987] avec certains algorithmes comme ceux de répartition de puissance (Load Flow) car le but recherché par ces algorithmes est simplement une solution faisable et l'ajustement des variables de contrôle se fait en accord avec des critères locaux. C'est ce qui se passe par exemple lorsque la tension d'un noeud du réseau accuse une violation de contrainte on actionne un transformateur réglable en charge pour ramener localement le niveau de la tension à une valeur donnée du domaine de faisabilité. La situation est complètement différente pour les algorithmes qui minimisent une fonction objective (OPF) ou un critère spécifique (LQG ou H-infinie) puisque le réglage des variables de contrôle est en accord avec un objectif global et toutes les variables participent à forcer la solution faisable à un certain minimum correspondant à la performance recherchée ( coût minimal, stabilité, robustesse, ....). Dans ce cas, un ajustement arbitraire des contrôles ne peut conduire qu'à une dégradation des performances recherchées par ces algorithmes et causer des violations de contraintes.



L'analyse de sensibilité de la solution aux variations des contrôles qui puisse aider l'utilisateur dans ses ajustements ne relève pas de la spécificité des algorithmes mentionnés [Venkatesh S. V., Liu W.H., Papalexopoulos A. D. 1992].

Ces défaillances pratiques peuvent être attribuées aux hypothèses simplificatrices utilisées dans la résolution. Abstraction faite de la nonlinéarité du système souvent négligée, on peut énumérer trois sources d'erreur qui dévie ces algorithmes de la solution exacte [Tinney W. F. 1987], [Sasson A. M., Merrill H. M. 1974]:

- l'équivalent électrique pour les charges, les réseaux externes ou les sous-systèmes non observables ne sont pas connus avec précision.

- les éléments discontinus de contrôle tels les compensateurs shunts sont considérés comme des variables continues. Ce qui donne des valeurs non conformes au mode de réglage discret.

- les variations des charges difficiles à contrôler sont négligées.

Plusieurs efforts ont été fournis pour augmenter la rigueur et la précision des algorithmes en y intégrant des hypothèses plus réalistes. Les modèles stochastiques des charges ont été considérés en répartition optimale de puissance [Viviani G. L., Heydt G. T.,

1981] et en stabilité petit signal[Burchett R. C., Heydt G. T. 1978]. Les méthodes combinatoires ont été utilisées pour représenter les éléments discrets[Lebow W. M., Rohani R., Nadira R., Usoro P. B., Mehra R. K., Sobieski D. W., Pal M. K., Bhavaraju M. P. 1985], [Hong Y. Y., Liu C. C. 1991], [Pereira M. V. F., Maceira M. E. P., Oliveira G. C., Pinto L. M. G. V. 1991]. Cependant les améliorations apportées ont été au détriment de la simplicité et de la rapidité d'exécution de l'algorithme. Cette complexité rend les algorithmes inutilisables en pratique[Fleming P. J., Fonseca C. M. 1994], [Tinney W. F. 1987].

Dans leurs analyses pour les problèmes de réseau, Stott[Stott B., Alsac O., Monticelli A. J. 1987] et Tinney[Tinney W. F. 1987] relèvent que le réseau électrique tel qu'il se présente réellement aujourd'hui est très complexe. Les moyens de calcul actuels et les outils mathématiques disponibles ne permettent pas de satisfaire toutes les exigences pratiques. L'introduction d'un grand nombre d'éléments discrets de contrôle dans le réseau a rendu les méthodes analytiques impuissantes[Tinney W. F. 1987]. Les techniques stochastiques qui donnent une information qualitative sur la robustesse de la solution utile en pratique rendent les algorithmes complexes et lents[Viviani G. L., Heydt G. T. 1981]. Tout cela ne laisse pas prévoir de solution définitive aux défaillances pratiques des algorithmes précédents. Laisser le problème à la discrétion de l'utilisateur ce n'est pas réaliste.

Le compromis suggéré par Tinney[Tinney W. F. 1987] pour les algorithmes OPF

est de développer une procédure ou une logique qui permettra d'ajuster la solution des algorithmes rapides standards existants (c.à.d les OPF qui ne traitent pas les variables stochastiques ou discrètes) de manière optimale pour quelle soit acceptable en pratique.

Une procédure a été proposée par Liu[Liu W.H., Papalexopoulos A. D., Tinney W. F. 1991] pour ajuster les contrôles shunts. La procédure s'exécute à la phase finale de la résolution de l'OPF pour fixer les contrôles shunts aux valeurs discrètes. Pour ne pas compromettre la convergence de l'algorithme, les contrôles sont arrondis d'une manière progressive c.à.d au fur et à mesure que les valeurs des contrôles approchent les paliers discrets.

La procédure proposée par Venkatesh[Venkatesh S. V., Liu W.H., Papalexopoulos A. D. 1992] permet une analyse de sensibilité de la solution OPF. La procédure utilise l'ensemble des contrôles actifs et réactifs et elle détermine au moyen du critère des moindres carrés les contrôles qui compensent d'une manière optimale les variations de charges. Cette procédure est destinée pour les algorithmes OPF qui traitent les contrôles actifs et réactifs d'une manière découplée.

Dans le domaine de stabilité petit signal le problème essentiel est la conception des régulateurs. Le type de régulateur dépend des performances désirées pour le réglage. Un régulateur conventionnel est conçu pour le modèle linéaire en un point d'opération. Les

méthodes de plan de phase[Yu Y. 1983], espace d'état ou placement des pôles[Lefebvre S. 1983] sont utilisées pour la détermination des paramètres du régulateur. Les performances d'un régulateur conventionnel sont limitées. Ce régulateur est sensible aux variations des paramètres du réseau.

Pour remédier à ce problème, les régulateurs adaptatifs ont été proposés[Pierre D. A. 1987]. Ces régulateurs sont équipés d'une fonction leur permettant de s'auto-ajuster à un environnement variable. Selon l'approche utilisée on distingue deux sortes de régulateurs adaptatifs:

- Le régulateur auto-ajustable (self tuning)[Åström K. J. 1980] où le modèle du réseau est identifié par la méthode des moindres carrés et l'ajustement des paramètres du régulateur se fait de manière à réduire la variance.

- Le régulateur à modèle de référence[Åström K. J. 1983] adapte ses paramètres aux variations du système en minimisant l'erreur entre la réponse du système et celle du modèle de référence.

Ce type de régulateur est sensible au bruit[Meyn S. P., Brown L. J. 1993]. Un régulateur adaptatif qui présente une certaine robustesse au bruit et aux variations incontrôlables des paramètres[Chen Z. J., Cook A. 1984] est dit: robuste.

Les techniques utilisées actuellement pour la conception des régulateurs robustes sont LQG[Doyle J. C., Glover K, Khargonekar P. P., Francis B. A. 1989], [Tahk M., Speyer J. L. 1987]. et H-infinie[Francis B.A., Doyle J. C. 1987], [Kimura H., Lu Y., Kawatani R. 1991]. Le but général de ces techniques est de déterminer une loi de commande qui stabilise le système en boucle fermée et le rendre insensible au bruit en minimisant un critère spécifique: une fonction coût quadratique pour LQG et la norme infinie pour l'approche H-infinie.

L'approche H-infinie apporte une certaine souplesse dans la conception d'un régulateur par rapport à la méthode d'espace d'état[Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. 1989] dans la mesure où la structure du contrôleur est variable. Cependant cette souplesse peut conduire à un contrôleur H-infinie si complexe et non réalisable[Tahk M., Speyer J. L. 1987].

Le problème commun aux algorithmes de conception des régulateurs et de répartition optimale de puissance c'est qu'ils n'optimisent qu'une seule performance[Fleming]. Or en pratique les exigences sont nombreuses et en conflit.

Le deuxième problème des algorithmes mentionnés c'est qu'ils ne représentent pas adéquatement les besoins réels[Tinney 1987]. Dans la planification de l'énergie réactive par exemple si on désire un profil plat pour les tensions (1 p.u. pour toutes tensions), la solution

optimale par un OPF peut conduire à un coût de compensation inadmissible. Inversement si on fixe le coût de compensation à la valeur désirée (minimale) le profil de tension peut devenir inacceptable. Aucune des deux solutions précédentes ne satisfait le planificateur qui préfère une solution intermédiaire. C'est à dire une solution où le compromis est optimal. Or les algorithmes et les procédures mentionnés n'optimisent pas le compromis. Le compromis se fait avant l'optimisation du problème en visant un objectif et en imposant des contraintes sur les autres. En procédant de cette manière, la coordination entre les objectifs n'est pas optimisée. Car la philosophie de base des méthodes d'optimisation sous contraintes utilisées par ces algorithmes ne permet pas une certaine flexibilité dans la formulation des objectifs[Fleming P. J., Fonseca C. M. 1994], [Derringer G., Suich R. 1980].

Nous remédions à ce problème par une autre philosophie.

### 1.3 Approche qualitative

Dans ce mémoire nous remédions aux problèmes des défaillances pratiques des algorithmes par une approche qualitative. La raison qui nous a amené à considérer cette approche c'est que la qualité est définie[Seaman C. M., Desrochers A. A., List G. F. 1993] comme la tentative de satisfaire plusieurs exigences en même temps. C'est en fait un problème d'optimisation simultanée de plusieurs objectifs. La deuxième raison c'est que dans le domaine de la qualité on optimise les grandeurs physiques et les propriétés qui leurs sont

associées. Cette approche nous permet de répondre aux exigences qualitatives et quantitatives de la pratique.

Dans le domaine de production industrielle, les entreprises sous la pression d'une concurrence féroce sont constamment à la recherche de nouvelles méthodes afin que leur produit satisfasse leurs clients. La solution c'est dans l'amélioration continue de la qualité.

Une méthode de contrôle de qualité connue sous le nom Taguchi[Taguchi G. 1986] qui a fait une percée remarquable dans les milieux industriels nord-américains[ASI 1984-1989] est utilisée ici pour améliorer l'efficacité pratique des algorithmes mentionnés.

Le but général de la procédure est d'obtenir une meilleure combinaison des facteurs de contrôle qui résulte en des performances caractéristiques des grandeurs réponses aussi proches que celles désirées incluant les variations des paramètres du système.

La fonction de désirabilité[Harrington C. E. 1965] est utilisée pour représenter les performances désirées par l'utilisateur d'une manière flexible. La coordination entre plusieurs objectifs est assurée par la fonction de désirabilité globale[Derringer G., Suich R. 1980]. Les variations des paramètres du système sont incluses dans l'analyse au moyen de l'espérance mathématique qui est estimée par la méthode des tableaux orthogonaux[Taguchi G. 1986]. La position des variables de contrôle qui donne la meilleure performance à la solution est sélectionnée par le rapport signal/bruit.

La procédure proposée couple l'analyse statistique à une stratégie d'optimisation bien définie. Elle est très pratique pour analyser les systèmes avec ou sans modèle mathématique en présence des variations incontrôlable des paramètres. Les tableaux orthogonaux permettent de traiter les variables discrètes comme les contrôles shunts. L'analyse de sensibilité en présence des interactions peut être effectuée. Dans la planification, la conception et le réglage des stabilisateurs l'opérateur peut sélectionner parmi les facteurs ceux qui sont efficaces. La procédure proposée peut être implantée dans les algorithmes standards comme une sous-routine qualitative. Elle peut être utilisée de manière interactive comme un utilitaire d'aide à la décision.

Notre conviction à la suite à ce travail est que les domaines diffèrent mais que les objectifs et les difficultés sont souvent les mêmes. En puisant dans le domaine de la qualité en ingénierie nous pensons présenter aux exploitants des réseaux électriques confrontés aux problèmes soulevés une contribution de qualité.

Ce mémoire est organisé comme suit: dans le chapitre 2 nous revoyons la méthode de Taguchi et sa philosophie en contrôle de qualité. Nous analysons au chapitre 3, par la procédure proposée, la qualité de la répartition économique de puissance dans les réseaux. Au chapitre 4 nous améliorons les performances du réglage des machines en stabilité petit signal. En conclusion de ce mémoire, nous discutons des avantages et des limitations de la procédure dans l'analyse qualitative des réseaux électriques.



*Chapitre 2***METHODE DE TAGUCHI****2.1 Introduction**

La méthode de Taguchi[Taguchi G. 1986] a été développée au Japon dans les années 70. La difficulté de traduction du japonais à l'anglais a retardé son apparition au U.S.A jusqu'aux années 80. La méthode est appliquée actuellement dans les grandes industries de fabrication en Amérique du nord[ASI 1984-1989]. Elle est considérée comme la plus efficace et la moins coûteuse en contrôle de qualité des produits. La popularité de la méthode est due à la qualité de sa philosophie[Pignatiello J. J. 1988]. C'est cette philosophie qui a changé la pratique utilisée en contrôle de qualité.

Le contrôle de la qualité est devenu actuellement une stratégie essentielle adoptée par les entreprises performantes afin que leur produit satisfasse leurs clients. Elle permet de diminuer les coûts et d'augmenter la productivité[Roy R. K. 1990]. Mais l'amélioration de la qualité ne s'improvise pas, elle est la conséquence d'une démarche systématique et scientifique[Clément B. 1992]. L'usage des méthodes statistiques est inévitable puisque les variations des paramètres sont omniprésentes dans le procédé et qu'elles sont associées directement à la non qualité.

Le contrôle conventionnel de qualité est basé sur la tolérance[Dehand K. 1989]. La qualité est jugée en tout ou rien (c.à.d bonne ou mauvaise) selon les performances obtenues par rapport à l'intervalle de tolérance. Si les performances d'un produit sont au delà de la tolérance limite, les mesures de correction et d'amélioration de qualité sont entreprises. La procédure classique consiste à rechercher les sources de dégradation de la qualité dans le procédé et de prendre des mesures souvent coûteuses, pour les éliminer ou les réduire. Taguchi a introduit de nouveaux concepts.

## 2.2 Philosophie de Taguchi

Selon Taguchi[Taguchi G. 1986], la meilleure qualité ne peut résulter que d'une meilleure connaissance du procédé et d'une bonne ingénierie qui doit accompagner le produit depuis sa conception jusqu'à sa réalisation. Le contrôle postérieur et les procédures administratives de garantie ne changent rien à la qualité d'un produit. Seules les méthodes scientifiques sont capables de donner au produit les performances voulues et de garantir sa qualité. Pour augmenter la qualité d'un produit, le moyen le plus efficace et le moins coûteux selon Taguchi est de rendre le produit insensible aux variations dans le système au lieu de chercher à éliminer ou à contrôler ces dernières.

Taguchi a mis ses idées en application en utilisant différentes techniques[Pignatiello J. J. 1988]. Nous revoyons ces techniques dans ce qui suit.

## 2.3 Spécification des performances

Pour pouvoir juger la qualité d'une manière continue et non en termes de bonne et mauvaise Taguchi a introduit la notion de spécification des performances. L'approche conventionnelle de mesure de la qualité qui se basait sur l'intervalle de tolérance est remplacé par une nouvelle philosophie dont voici ses principes:

La performance caractéristique désirée doit être spécifiée en terme de *valeur* idéale à atteindre (target value) et non en terme de *tolérance*. Par exemple si la performance désirée pour la tension en un noeud du réseau est 1pu, la valeur idéale à atteindre doit être 1p.u. et non l'intervalle [0.9, 1.1]. Cette spécification des performances constitue la première démarcation de Taguchi de la pratique courante à savoir que toute performance à l'intérieur d'un intervalle de tolérance est acceptable. Cela conduit un utilisateur à être satisfait pour tout l'intervalle et subitement il devient insatisfait à l'extérieur de l'intervalle. Ce n'est pas réaliste.

Selon Taguchi[Taguchi G. 1986], il y a trois types de spécifications possibles pour une performance caractéristique donnée:

- *le plus petit est le meilleur.*
- *le plus grand est le meilleur.*
- *la valeur spécifiée est la meilleure.*

Par exemple, si on considère les trois grandeurs d'un réseau électrique: le coût de production, la tension en un noeud et la marge de stabilité, les performances désirées pour les trois grandeurs peuvent être spécifiées respectivement: *le plus petit est le meilleur, la valeur spécifiée est la meilleure, le plus grand est le meilleur*. Nous précisons ici que la première et la troisième spécification visent le minimum et le maximum des valeurs physiquement permises.

Lorsque la performance désirée est spécifiée, toute valeur obtenue qui ne se conforme pas à la spécification établie présente une dégradation de la qualité. Par exemple si la performance *1 p.u. est le meilleur* est spécifiée pour une certaine grandeur, une valeur 0.99p.u. de cette grandeur n'a pas encore la qualité qu'elle faut.

## 2.4 Fonction “pertes”

Pour Taguchi, on ne peut dissocier la qualité du coût. Toute dégradation de qualité engendre des pertes pour la société (retour des produits pour la réparation ou produits non vendus). Pour caractériser les pertes en argent imputées à la société du moment où le produit n'a pas la qualité requise Taguchi utilise une fonction quadratique appelée fonction “pertes”.

Taguchi ne donne pas de justification mathématique à sa fonction “pertes”. Ce sont

les constatations pratiques qui ont amené Taguchi à définir cette fonction. Ainsi il a été constaté[Taguchi G. 1986] dans le domaine de fabrication industrielle que les performances d'un produit varient selon le réglage des machines à l'intérieur de leur intervalle de tolérance prescrite. Le produit était performant pour un certain réglage bien spécifique dans l'intervalle de tolérance. Cette constatation était à l'origine de la définition de la fonction "pertes". Taguchi a utilisé cette fonction pour représenter la réalité observée à savoir que la qualité est meilleure pour une certaine valeur (optimale) et se dégrade progressivement au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'optimum et non en tout ou rien ( bonne ou mauvaise).

### **2.4.1 Forme analytique**

La fonction "pertes" peut être considérée comme une troncation de la série de Taylor[Pignatiello J. J. 1988]. Cette approximation est généralement admise et elle est la base de la théorie statistique des moindres carrés[Kacker R. N, Lagergren E. S, Filliben J. J. 1991].

Soit  $y$  une certaine grandeur caractéristique et  $\tau$  la valeur désirée. Par exemple  $y$  peut être l'une des grandeurs suivantes d'un réseau électrique: tension , marge de stabilité, taux de défaillance,..... La déviation de  $y$  par rapport à  $\tau$ , engendre des pertes. Soit  $L(y)$  la fonction représentant ces pertes. La fonction "pertes" est généralement non négative dans l'intervalle considéré  $I_y$  et elle est égale à zéro pour  $y=\tau$ . Le développement en série de Taylor de  $L(y)$  autour de  $\tau$  est:

$$L(y) = L(\tau) + L'(\tau)(y-\tau) + \frac{1}{2}L''(\tau)(y-\tau)^2 + \dots \quad (2.1)$$

Puisque à  $y=\tau$ , les pertes sont supposées zéro ( $L(\tau)=0$ ) et elles correspondent au minimum de  $L(y)$  donc la dérivée première s'annule ( $L'(\tau)=0$ ), l'équation 2.1 devient:

$$L(y) = \frac{1}{2}L''(\tau)(y-\tau)^2 + \dots \quad (2.2)$$

Si on néglige les termes d'ordre supérieur à deux dans l'intervalle  $I_y$  supposé suffisamment petit, la forme simplifiée de la fonction "pertes" est:

$$L(y) = k(y-\tau)^2 \quad (2.3)$$

$k$  est une constante qui peut être déterminée connaissant les pertes pour une certaine valeur de  $y$ .

## 2.5 Optimisation des performances

Comme la qualité d'un produit dépend du dosage des éléments qui le constituent et

du réglage des paramètres du procédé de fabrication, la bonne qualité peut être obtenue par un choix judicieux des niveaux des facteurs d'entrée du procédé. La combinaison des facteurs d'entrée qui donnent la meilleure performance au produit est celle qui minimise la fonction "pertes"[Taguchi G. 1986]. C'est là où Taguchi apporte une contribution importante. Il a su relier la fonction pertes au concept ``flou`` de qualité.

Remarque:

La fonction "pertes" ne doit pas être considérée comme un simple indice de performance. La fonction "pertes" de Taguchi représente une réalité physique. La constante k de l'équation 2.3 est une caractéristique des pertes réelles dans le procédé est non un simple coefficient de pondération.

### 2.5.1 Optimisation analytique

Si l'expression analytique de  $y=f(X)$  est connue et les variations des paramètres ne sont pas considérées, la position des facteurs X solution peut être obtenue par une résolution analytique ou numérique d'un problème d'optimisation statique(2.4)[Young D. L, Teplik J, Weed H. D, Trancht N. T, Alvarez A. R. 1991]:

$$\begin{aligned} \min_x L(y) &= k(y-\tau)^2 \\ \text{s/c} \quad y &= f(X) \end{aligned} \tag{2.4}$$

En pratique, le modèle mathématique n'est pas toujours disponible ou il est complexe c'est ce qui rend la solution analytique du problème non envisageable. La construction d'un modèle mathématique au moyen d'une technique d'estimation (comme les moindres carrés) qui est un préalable aux méthodes analytiques d'optimisation n'est pas la solution élégante.

### 2.5.2 Variations des paramètres

Dans un procédé réel de fabrication, les variations incontrôlables des paramètres sont nombreuses et omniprésentes (vibrations, usure, détérioration,...) et elles sont associées directement à la non qualité [Ross P. J. 1988]. La performance d'un produit ne peut être statique et la fonction pertes varie d'une manière aléatoire. Cette stochasticité peut être incluse dans l'analyse au moyen de l'espérance mathématique.

Si on désigne par  $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$  l'espace bruit et  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  les facteurs d'entrée; l'espérance mathématique de  $L(y)$  à une entrée spécifiée  $X$  sous le bruit  $\Omega$  est:

La bonne position des entrées  $X$  qui donne la meilleure performance  $y$  sous  $\Omega$ , est

$$EL_{\Omega}(X) = kE_{\Omega}\{(y-\tau)^2\} \quad (2.5)$$

celle minimise l'espérance mathématique  $EL_{\Omega}(X)$ .



Cette formulation qualitative du problème peut être représentée par le diagramme bloc ci-dessous.

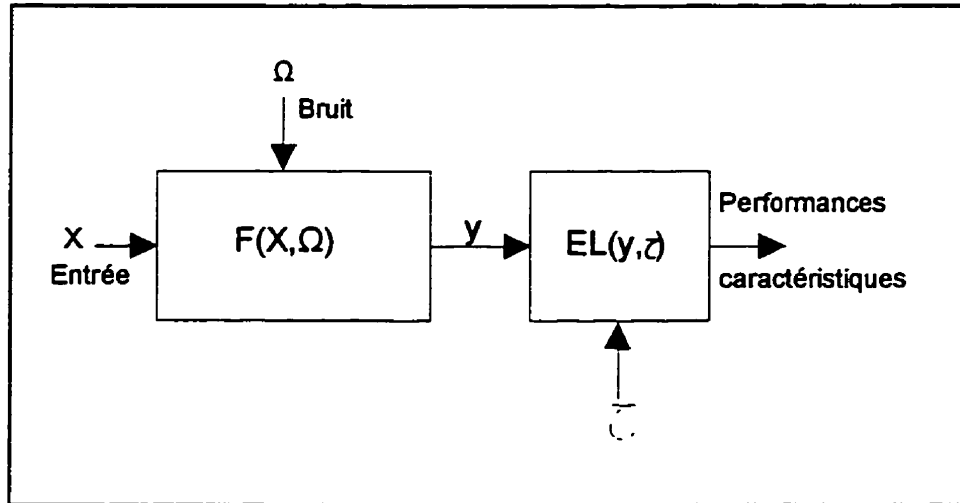


Figure 2.1: Diagramme bloc pour le contrôle de qualité.

Le diagramme bloc pour le contrôle de qualité ci-dessus représente le système par sa fonction de transfert  $F$  où la sortie  $y$  passe à travers le bloc qualité  $EL$  dont les sorties sont les performances caractéristiques.

Nous constatons que dans le cas où les variations du système sont prises en compte, le problème devient stochastique, et la minimisation de la fonction pertes en présence de bruit peut être formulée sous la forme générale d'un problème d'optimisation stochastique:

$$\min_x EL(y) = kE\{(y-\tau)^2\}$$

$$s/c \quad y=f(X) \quad (2.6)$$

*la fonction de distribution*

La même formulation on la rencontre dans la répartition stochastique optimale de puissance[Viviani G. L, Heydt G. T. 1981]. Cependant ici, la solution analytique n'est pas possible à cause de l'indisponibilité des fonctions de distribution de y pour chaque X sous le bruit. Leur estimation par des techniques comme Monte Carlo suppose une connaissance de la distribution du bruit et demande un temps de simulation excessif. Taguchi utilise les tableaux orthogonaux et optimise le problème (2.6) en deux étapes:

- 1)- trouver la position des X qui minimise la variance (*facteurs de contrôle*).
- 2)-utiliser les X qui ont moins (ou pas) d'influence sur la variance pour ajuster la moyenne à la valeur spécifiée (*facteurs d'ajustement* ).

Taguchi ne donne pas de justification mathématique à sa procédure d'optimisation. Il affirme[ASI 1984-1989] que le but visé par cette stratégie de diviser les variables d'entrée en deux groupes - facteurs de contrôle (qui agissent sur la variance) et les facteurs d'ajustement (qui agissent sur la moyenne) est de rendre l'optimisation du problème plus simple et accessible à l'utilisateur (l'utilisateur peut choisir les facteurs qu'il veut et les fixer

aux niveaux qu'il veut). L'autre objectif visé c'est qu'une fois le système est optimisé certains changements au produit ou au procédé peuvent être accommodés en agissant seulement sur les facteurs d'ajustement sans toucher aux facteurs de contrôle qui affectent la variance donc en partie la qualité du produit.

## 2.6 Stratégie d'optimisation de Taguchi

La procédure d'optimisation en deux étapes de Taguchi peut être obtenue en décomposant l'équation (2.5) comme suit [Leon R. C, Shoemaker A. C, Kaker R. N. 1987]:

$$\begin{aligned}
 EL_{\alpha}(X) &= kE_{\alpha}\{(Y-\tau)^2\} \\
 &= kE_{\alpha}\{(Y-\mu+\mu-\tau)^2\} \\
 &= kE_{\alpha}\{(Y-\mu)^2\} + kE_{\alpha}\{(\tau-\mu)^2\} \\
 EL_{\alpha}(X) &= k\sigma^2 + k(\tau-\mu)^2
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

où

$$\mu = \int_{I_y} y f(y) dy
 \tag{2.8}$$

et

$$\sigma^2 = \int_{I_y} (y-\mu)^2 f(y) dy
 \tag{2.9}$$

$\mu$ ,  $\sigma^2$  et  $f$  sont la moyenne, la variance et la densité de probabilité de  $y$ , sous  $\Omega$ , à une entrée spécifique  $X$ .

La minimisation de l'équation (2.7) correspond à une optimisation simultanée des deux réponses surfaces  $\mu(X)$  et  $\sigma^2(X)$  inconnues. Une possibilité d'une solution analytique du problème consiste à construire les modèles de surface  $\mu(X)$  et  $\sigma^2(X)$  et utiliser la méthode de Ridge [Draper N. R. 1963], [Myers R. H, Carter W. H. 1973]. Taguchi détourne la difficulté liée à la construction des modèles mathématiques et de l'optimisation analytique et il utilise les tableaux orthogonaux pour estimer la variance et la moyenne de l'équation (2.7).

Pour permettre au lecteur une meilleure compréhension de cette stratégie nous l'illustrons comme suit:

Considérons un système à trois entrées  $x$ ,  $m$  et  $a$ . La sortie  $y=f(x,m,a)$  est représentée à la figure 2.2 pour deux valeurs de  $m$  et  $a$ .

Dans la figure 2.2, les valeurs  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  et  $y_4$  de  $y$  correspondent aux combinaisons  $(x_1, m_1, a_1)$ ,  $(x_2, m_1, a_1)$ ,  $(x_1, m_2, a_1)$ ,  $(x_2, m_2, a_1)$  des facteurs d'entrée. Le bruit à l'entrée  $x$  du système est représenté par sa variance autour de  $x_1$  et  $x_2$ .

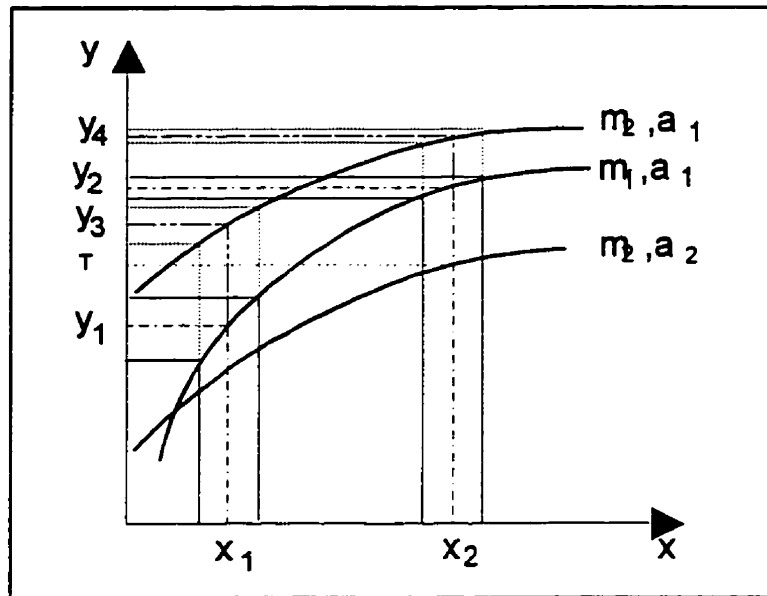


Figure 2.2: Effets des variations des paramètres d'entrée sur la performance de la sortie

En  $y_1$ , les variations de l'entrée  $x$  sont transmises à la sortie. Pour réduire les variations de la sortie  $y_1$ , la procédure intuitive consiste à réduire les variations de l'entrée  $x_1$ . Ce n'est pas possible si  $x$  est stochastique et c'est généralement coûteux. Taguchi exploite les non linéarités du système et les interactions entre les paramètres pour réduire les variations de la sortie.

Ainsi on constate sur la figure 2.2 que pour  $y_3=f(x_1, m_2, a_1)$  les variations de la sortie sont atténuées à cause de l'interaction entre  $x$  et  $m$ . En  $y_2=f(x_2, m_1, a_1)$  les variations sont réduites à cause de la non-linéarité. En  $y_4=f(x_2, m_2, a_1)$  les deux effets (interaction et non linéarité) s'ajoutent pour réduire d'avantage les variations de la sortie.

Dans cet exemple, la position des facteurs d'entrée qui minimisent la variance de  $y$  est  $x_2, m_2, a_1$ . La réponse correspondante est  $y_4$ .

Pour ajuster  $y_4$  à la valeur désirée (par exemple)  $\tau$ , il faut traduire verticalement la courbe  $(m_2, a_1)$  de  $y_4$  à  $\tau$  et c'est le rôle des paramètres d'ajustement. Ici, la valeur  $a_2$  de  $a$  assure l'ajustement de  $y_4$  à  $\tau$  sans dégrader la variance. La solution optimale avec cette procédure de Taguchi est  $x_2, m_2, a_2$ .

## 2.7 Tableaux orthogonaux

### 2.7.1 Définition

En analyse combinatoire [Bose R. C., Manvel B. 1984], deux matrices  $A = (a_{ij})$  et  $B = (b_{ij})$   $n \times n$ , de nombres  $1, 2, \dots, n$  sont dites *orthogonales* si pour chaque combinaison ordonnée de nombre  $(a, b)$  il existe un couple d'indice  $(i, j)$  tel que  $a = a_{ij}$  et  $b = b_{ij}$ .

L'orthogonalité d'une matrice entraîne une répartition bien spécifique de ses éléments et la propriété intéressante suivante [Kacker R. N, Lagergren E. S, Filliben J. J. 1991]: chaque combinaison ordonnée  $(x_{ij}, y_{ik})$  formée par les éléments de la ligne  $i$  des colonnes  $j$  et  $k$  d'une matrice orthogonale  $X$ , apparaît *au plus une fois* dans la paire de colonnes  $(j, k)$  que dans toute autre paire de colonnes de la matrice.

Un tableau orthogonal est une matrice  $n \times m$  construite à partir de la propriété d'orthogonalité ci-dessus en remplaçant l'expression *au plus une fois* par *autant de fois* [Hall M. 1967].

#### Exemple:

Le tableau  $OA_8(2^7)$  ci-dessous est un tableau orthogonal (TO) de 8 lignes et de 7 colonnes. La combinaison  $(-1, -1)$  par exemple, apparaît à la ligne 1 et à la ligne 2 pour les colonnes A et B. C'est une combinaison double. Nous pouvons vérifier que la combinaison considérée apparaît 2 fois dans chaque paire de colonnes du tableau 2.1.

Tableau 2.1: Tableau orthogonal  $OA_8(2^7)$ 

No	Facteurs						
	A	B	C	D	E	F	G
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	1	1	1	1
3	-1	1	1	-1	-1	1	1
4	-1	1	1	1	1	-1	-1
5	1	-1	1	-1	1	-1	1
6	1	-1	1	1	-1	1	-1
7	1	1	-1	-1	1	1	-1
8	1	1	-1	1	-1	-1	1

Les combinaisons  $(-1, 1)$ ,  $(1, -1)$  et  $(1, 1)$  ont la même propriété que la combinaison  $(-1, -1)$ . Cette propriété est utilisée pour la construction d'un TO.

Dans le tableau 2.1, les chiffres -1 et 1 désignent les niveaux physiques des facteurs. C'est un simple codage qui peut être fait avec d'autres chiffres ou des lettres. Taguchi utilise les chiffres 1, 2, 3 pour désigner les trois niveaux d'un facteur.

L'utilisation pratique d'un tableau orthogonal se fait en affectant chaque facteur ou paramètre à étudier à une colonne du tableau. Les lignes d'un TO représentent les combinaisons des niveaux des facteurs. Les éléments du tableau sont les niveaux (ou modalités) des facteurs.

Le tableau 2.1 permet de représenter un maximum 7 paramètres à deux modalités.



Dans le cas où le nombre de paramètre à étudier est supérieur à 7, il faut choisir un tableau de dimension plus grande que 7. Nous verrons dans le paragraphe qui suit comment générer des TO de dimensions différentes. Notons aussi que les catalogues des TO existent [Clément B. 1992].

Les tableaux orthogonaux sont conçus pour une réduction optimale des grands nombres factoriels [Bose R. C. 1952] [Hunter J. S. 1985]. Le TO  $OA_8(2^7)$  par exemple, contient 8 (ou  $2^3$ ) combinaisons, soit 1/16 des 128 (ou  $2^7$ ) possibilités correspondant à l'ensemble des combinaisons possibles de 7 facteurs à deux modalités.

### 2.7.2 Tableaux à deux modalités

Les tableaux à deux modalités (-1, 1 par exemple) sont utiles pour représenter d'une manière simple les variations des facteurs (bruit). Par exemple, dans le cas des variations statistiques de la charge P, les éléments -1 et +1 du tableau orthogonal correspondent à P- $\Delta P$  et P+ $\Delta P$ .

Un TO à deux modalités de  $2^r$  lignes et  $2^r - 1$  colonnes ( $r=2, 3, \dots$ ) peut être construit colonne par colonne en deux étapes:

1- écrire dans les r colonnes de base associées aux numéros (1, 2, 4, ...,  $2^{r-1}$ ) le plan factoriel complet des r facteurs à deux modalités.

2- générer les autres colonnes à partir de l'expression (2.10) en utilisant l'addition modulo 2.

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_rx_r \quad (2.10)$$

où  $x_1, x_2, \dots, x_r$  sont les  $r$  colonnes de base et les coefficients  $a_1, a_2, \dots, a_r$  sont obtenus à partir du tableau 2.2 en choisissant la ligne qui correspond à la colonne recherchée.

Tableau 2.2: Coefficients générateurs pour un TO à deux modalités.

colonne	coefficients					
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	....	$a_{r-1}$	$a_r$
1	1	0	0		$2^{r-2}-1$ zéro	$2^{r-1}-1$ zéro
2	0	1	0		$2^{r-2}$ un	$2^{r-1}$ un
3	1	1	0		$2^{r-2}$ zéro	
4	0	0	1		$2^{r-2}$ un	
5	1	0	1			
6	0	1	1			
7	1	1	1			
.	.	.	.			
.	.	.	.			
.	.	.	.			
$2^r-1$	1	1	1			

### 2.7.2.1 Exemple

Nous illustrons la construction du tableau  $OA_8(2^7)$  de la page 26.

Le  $OA_8(2^7)$  a 8 lignes. Nous avons mentionné précédemment que le nombre de lignes d'un TO à deux modalités est de la forme  $2^r$ . Soit  $8=2^r$  ou  $r=3$ .

Connaissant  $r$  (le nombre de colonne de base), nous appliquons l'étape 1:

1- Nous écrivons le plan factoriel  $2^3$  pour les 3 colonnes de base notées  $x_1, x_2$  et  $x_3$  et nous les plaçons aux colonnes 1, 2 et 4 du tableau 2.3.

Pour générer les colonnes manquantes 3, 5, 6 et 7 du tableau 2.3, nous passons à l'étape 2:

Tableau 2.3: Plan factoriel complet  $2^3$   
formant 3 colonnes de base.

lignes	colonnes						
	1	2	3	4	5	6	7
	$x_1$	$x_2$	$x_3$				
1	0	0	0				
2	0	0	1				
3	0	1	0				
4	0	1	1				
5	1	0	0				
6	1	0	1				
7	1	1	0				
8	1	1	1				

2- Le tableau 2.2 des coefficients générateurs pour  $r=3$  se réduit au tableau 2.4.

L'expression génératrice des colonnes (2.10) pour  $r=3$  devient:

$$a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (2.11)$$

Pour générer la colonne 3 qui manquent dans le tableau 2.3 (par exemple), nous remplaçons les coefficients  $a_1, a_2, a_3$  par les valeurs 1, 1, 0 correspondantes (ligne 3 du tableau 2.4) dans l'expression (2.11). Ainsi, nous obtenons l'expression génératrice de la colonne 3. Soit  $x_1 + x_2$ .

La colonne 3 du tableau 2.3 s'obtient donc en effectuant l'addition (modulo 2) des colonnes de base  $x_1$  et  $x_2$ .

Tableau 2.4: Coefficients générateurs  
de 7 colonnes à deux modalités .

colonne	coefficients		
	$a_1$	$a_2$	$a_3$
1	1	0	0
2	0	1	0
3	1	1	0
4	0	0	1
5	1	0	1
6	0	1	1
7	1	1	1

La colonne 3 obtenue est montrée au tableau 2.5.

En procédant de la même manière, nous obtenons les expressions génératrices  $x_1+x_3$ ,  $x_2+x_3$  et  $x_1+x_2+x_3$  des colonnes 5, 6 et 7 du tableau 2.5.

Le tableau 2.5 ne diffère du tableau 2.1 que par le codage des éléments (0, 1 au lieu de -1, 1).

Tableau 2.5: Tableau orthogonal  $OA_8(2^7)$ .

lignes	colonnes						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	0	0	1

### 2.7.3 Tableaux à trois modalités

Les tableaux à trois modalités (-1, 0 et +1) sont utiles pour représenter les ajustements des facteurs de contrôle. Ainsi, les 3 modalités correspondent aux niveaux d'ajustement des contrôles: niveaux inférieurs (-1), pas d'ajustement (0), niveaux supérieurs (+1).

Un TO à trois modalités de  $3^r$  lignes et  $(3^r - 1)/(3 - 1)$  colonnes ( $r=2, 3, \dots$ ) peut être construit colonne par colonne en deux étapes:

-écrire dans les  $r$  colonnes de base associées aux numéros (1, 2, 5, ...,  $(3^{r-1}-1)/(3-1)+1$ )

le plan factoriel complet des  $r$  facteurs à trois modalités 0, 1 et 2.

Tableau 2.6: Coefficients générateurs pour 3 modalités

colonne	coefficients					
	$a_1$	$a_2$	...	$a_{r-1}$	$a_r$	
1	1	0		$(3^{r-2}-1)/(3-1)$	zéro	$(3^{r-1}-1)/(3-1)$
2	0	1		$3^{r-2}$	un	$3^{r-1}$
3	1	1		$3^{r-2}$	zéro	
4	2	1		$3^{r-2}$	un	
5	.	0		$3^{r-2}$	deux	
.	.	0				
.	.	0				
.		1				
.		1				
.		1				
.		2				
		2				
		2				
		2				
		.				
		.				
$(3^r - 1)/(3 - 1)$		.				

-générer les autres colonnes à partir de l'expression (2.10) (en utilisant l'addition modulo 3) où les  $x_1, x_2, \dots, x_r$  sont les  $r$  colonnes de base et les coefficients  $a_1, a_2, \dots, a_r$  sont les éléments du tableau 2.6.

### 2.7.3.1 Exemple

Nous illustrons la construction d'un  $OA_9(3^4)$ .

Un  $OA_9(3^4)$  a 9 lignes. Soit  $9=3^r$  ou  $r=2$ . Le plan factoriel complet des 2 colonnes de base est montré au tableau 2.7.

Tableau 2.7: Plan factoriel complet  $3^2$  formant les colonnes de base

ligne	colonnes			
	1	2	3	4
	$x_1$	$x_2$		
1	0	0		
2	0	1		
3	0	2		
4	1	0		
5	1	1		
6	1	2		
7	2	0		
8	2	1		
9	2	2		

Tableau 2.8: Tableau orthogonal  $OA_9(3^4)$

ligne	colonnes			
	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	1	1	1
3	0	2	2	2
4	1	0	1	2
5	1	1	2	0
6	1	2	0	1
7	2	0	2	1
8	2	1	0	2
9	2	2	1	0

En procédant de la même manière que l'exemple 2.7.2.1 nous obtenons les expressions génératrices:  $x_1+x_2$ ,  $2x_1+x_2$  des colonnes manquantes 3 et 4 du tableau 2.7.

L'addition modulo 3 de ces expressions donne le résultat du tableau 2.8.

## 2.8 Intérêt des TO

Une propriété intéressante des tableaux orthogonaux c'est que les niveaux des paramètres ont la même fréquence de répétibilité. Nous exploitons cette propriété, dans les chapitres 3 et 4, pour analyser la sensibilité de la solution aux paramètres stochastiques d'un réseau électrique. Nous montrons ci dessous comment utiliser un tableau orthogonal pour représenter les variations incontrôlables (bruit) des facteurs.

### 2. 8.1 Exemple

Soit trois paramètres stochastiques  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$ . Ces paramètres peuvent être les charges d'un réseau électrique. Supposons que les trois charges sont soumises à des variations stochastiques de moyenne nulle avec une certaine variance.

Nous modélisons le bruit par sa variance autour la puissance nominale. c.à.d chaque charge peut prendre et de manière aléatoire trois valeurs (ou niveaux)  $S_i - \Delta S_i$ ,  $S_i$ ,  $S_i + \Delta S_i$  ( $i=1,2,3$ ). On a donc trois facteurs à trois niveaux. Désignons ces niveaux par les chiffres  $(-1,0,1)$ .

Les combinaisons possibles de ces 3 facteurs à 3 niveaux sont données par le nombre factoriel  $3^3$ . Soit 27 combinaisons. Nous voulons réduire le nombre de combinaisons de 27 à un nombre plus petit mais représentatif. c.à.d qui contient la même information (bruit de moyenne nulle avec une certaine variance). La méthode de construction des TO à trois modalités du paragraphe 2.7.3 permet d'extraire un TO de 9 combinaisons des 27

combinaisons possibles. Soit le tableau 2.9 où les trois charges  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  sont affectées aux trois premières colonnes du tableau 2.8. La colonne 4 du tableau 2.8 n'est pas utilisée. Cela n'a aucune importance puisque l'une des caractéristiques essentielles des TO c'est que les niveaux des facteurs ont la même probabilité ou fréquence de répétabilité dans chaque colonne. Nous obtenons donc le tableau ci-dessous.

Tableau 2.9: Tableau orthogonal  $OA_9(3^3)$

lignes	colonnes		
	$S_1$	$S_2$	$S_3$
1	0	0	0
2	0	1	1
3	0	2	2
4	1	0	1
5	1	1	2
6	1	2	0
7	2	0	2
8	2	1	0
9	2	2	1

Nous avons représenté graphiquement les plans factoriels des 27 combinaisons possibles à la figure 2.3 et 9 combinaisons (correspondant à  $1/3$  des plans factoriels) dans les figures 2.4a et 2.4b. Nous constatons que les 9 points de la figure 2.4a sont répartis autour de la position centrale à raison de 3 points par plan dans le sens vertical et horizontal. Ce n'est pas le cas dans la figure 2.4b.



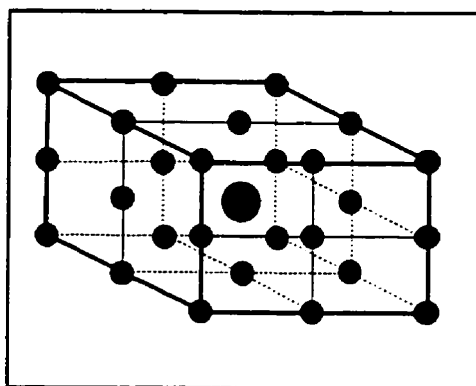


Figure 2.3: 27 combinaisons de 3 facteurs à 3 modalités

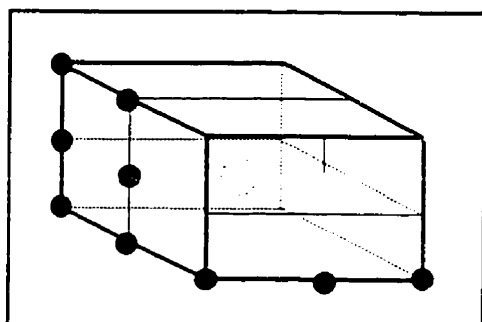


Figure 2.4b: 9 combinaisons ne formant pas un tableau orthogonal.

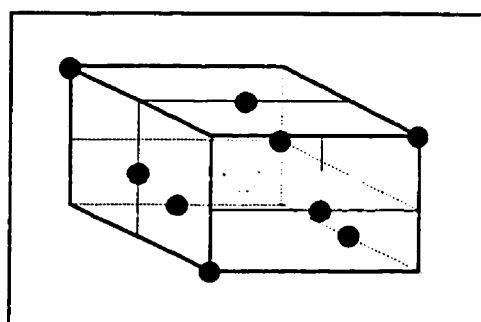


Figure 2.4a: 9 combinaisons formant le tableau orthogonal  $OA_3(3^3)$

## 2.9 Rapport signal-bruit

Taguchi a introduit le rapport signal-bruit comme critère de performance de la qualité [Taguchi G. 1986]. L'avantage de ce rapport c'est qu'il simplifie l'optimisation du problème. Avec cet estimateur l'optimisation simultanée de la moyenne et de la variance se fait en une seule étape en maximisant le rapport signal/bruit.

Le rapport signal/bruit  $\eta$  correspondant aux performances caractéristiques définies au paragraphe 2.3 est [Taguchi G. 1986]:

$$\eta = 10 \log_{10} \left( \frac{\mu^2}{\sigma^2} \right) \quad (2.12)$$

pour la valeur spécifiée est la meilleure.

$$\eta = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.13)$$

pour le plus petit est le meilleur.

$$-\eta = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.14)$$

pour le plus grand est le meilleur.

Taguchi ne donne pas de justification mathématique à son estimateur. Les fondements théoriques de ce rapport sont traités et commentés dans les références[Kackar R. N, Lagergren E. S, Filliben J. J. 1985], [Leon R.C, Shoemaker A. C, Kaker R. N. 1987].

Ce rapport est très populaire dans le milieu industriel à cause de sa simplicité et son efficacité[ASI 1984-1989].

## 2.10 Discussion de la méthode de Taguchi

Nous avons exposé et commenté ce qui est la méthode de Taguchi. Le lecteur peut se rendre compte que ce qui est appelé méthode de Taguchi c'est essentiellement des idées que Taguchi a mis en application au moyen des techniques dont les fondements théoriques ont demandé plusieurs travaux de recherche sur la méthode.

Si les techniques utilisées par Taguchi sont discutables et elles peuvent être adaptées au contexte d'utilisation ses idées restent de qualité et c'est ce qui a fait sa popularité.

Notre motivation dans ce travail a pour objectif d'exploiter les idées de Taguchi que nous jugeons intéressantes pour traiter les problèmes pratiques qui se posent dans les réseaux électriques. En particulier:

- Les spécifications des performances d'une manière qualitative qui permettent à

l'opérateur dans les réseaux électriques de formuler ses besoins réels de manière flexible et non sous forme de contraintes.

-Les tableaux orthogonaux qui permettent de modéliser les éléments discrets ou le bruit de manière simple et d'estimer les interactions entre les paramètres.

-Le rapport signal/bruit qui est pratique comme critère de sélection.

Cependant pour exploiter les idées de Taguchi dans le domaine des réseaux électriques nous heurtons au problème suivant:

Taguchi optimise la fonction pertes. Cette fonction caractérise les pertes en argent lorsque le produit n'a pas les spécifications requises. Ce n'est le cas dans les réseaux électriques.

Nous remédions à cela par la fonction de désirabilité[Harrington C. E. 1965], [Derringer G., Suich R. 1980], [Young D. L., Teplik J., Weed H. D., Trancht N. T., Alvarez A. R. 1991]. Ainsi nous utilisons la fonction de désirabilité pour caractériser les pertes en satisfaction de l'utilisateur lorsque une grandeur du réseau n'a pas les spécifications désirées.

## 2.11 Fonction de désirabilité

La fonction de désirabilité a été introduite en contrôle de qualité par Harrington[Harrington C. E. 1965] pour caractériser la performance d'une grandeur. Une formulation simple de cette fonction est définie ci-dessous[ Derringer G., Suich R. 1980].

### 2.11.1 Définition

Soit  $y$  une grandeur donnée,  $\tau$  la valeur idéale désirée et  $[Y^-, Y^+]$  l'intervalle de tolérance limite de  $y$ . Le degré de satisfaction pour chaque valeur de  $y$  appartenant à l'intervalle de tolérance peut être représenté par une fonction de désirabilité  $d$  définie comme suit[Derringer G., Suich R. 1980]:

$$d : [Y^-, Y^+] \longrightarrow [0,1]$$

$$d(y) = \begin{cases} \left( \frac{y - Y^-}{\tau - Y^-} \right)^s & Y^- \leq y \leq \tau \\ \left( \frac{Y^+ - y}{Y^+ - \tau} \right)^t & \tau \leq y \leq Y^+ \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.15)$$

où  $s$  et  $t$  sont des constantes.

$d$  est définie de sorte qu'elle prend la valeur 0 quand  $y$  viole les contraintes, augmente avec la désirabilité de  $y$  et prend 1 quand  $y$  est égal à  $\tau$ . Les poids  $s$  et  $t$  permettent ajuster l'allure de  $d$  à la forme désirée.

La figure 2.5 montre l'allure de  $d$  dans l'intervalle  $[0.8 \ 1.5]$  pour  $\tau=1$  et pour les différentes valeurs de  $s$  et  $t$ .

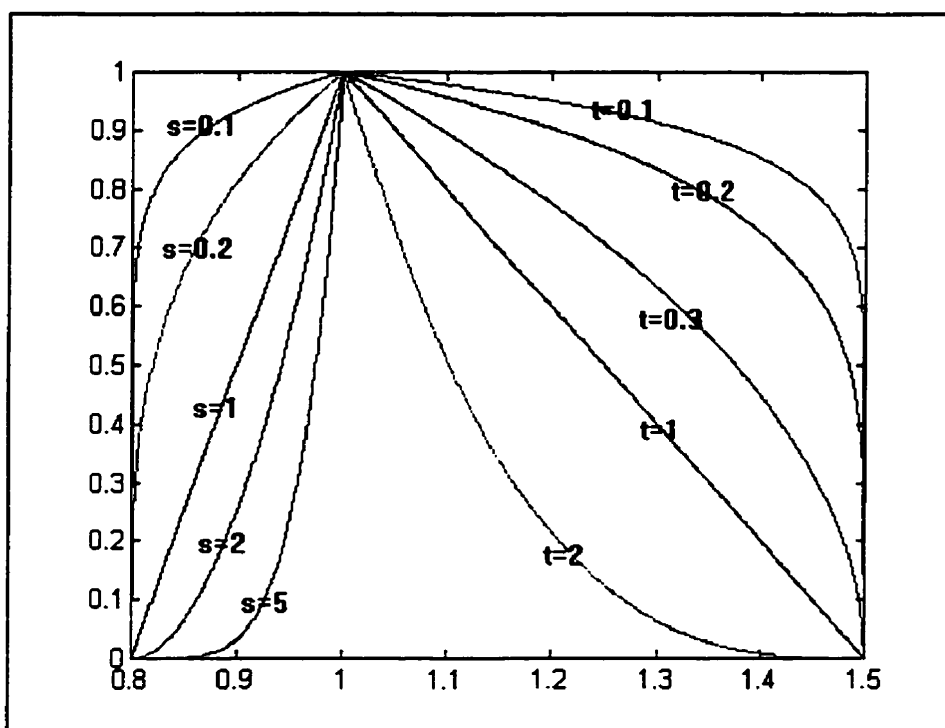


Figure 2.5: Fonction de désirabilité pour différentes valeurs de  $s$  et  $t$  avec  $\tau=1$ ,  $Y^-=0.8$  et  $Y^+=1.5$

### 2.11.2 Optimisation simultanée de plusieurs réponses

Dans les réseaux électriques, les objectifs sont multiples et ils sont souvent en conflit. L'exploitant tente à travers l'ajustement des contrôles de trouver une bonne coordination entre tous les objectifs. C'est un problème d'optimisation simultanée de plusieurs réponses.

La méthode généralement utilisée pour la solution de ce genre de problème est la transformation des objectifs multiples en un seul au moyen de la somme pondérée [Brayton R. K., Hachtel G. D., Sangiovanni-Vincentelli A. L. 1981], [Stott B., Alsac O., Monticelli A. J. 1987]:

$$F = \sum_i \alpha_i f_i \quad (2.16)$$

où:

$f_i$  est la fonction objective simple,  $\alpha_i$  le coefficient de pondération représentant l'importance accordée à  $f_i$ , et  $F$  la fonction coût global.

L'inconvénient de la somme pondérée (2.16) réside dans le choix des coefficients de pondération. Notons aussi que si la proportion entre les  $f_i$  est grande la formulation (2.16) peut entraîner des résultats surprenants [Stott B., Alsac O., Monticelli A. J. 1987].

Pour l'optimisation simultanée de plusieurs performances nous utilisons la fonction de désirabilité globale définie comme suit [Derringer G., Suich R. 1980]:

$$D = \left( \prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.17)$$

où D est la désirabilité globale et  $d_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) les désirabilités individuelles.

La désirabilité globale D appartient aussi dans l'intervalle  $[0,1]$ , prend la valeur 0 si une grandeur  $y_i$  est inacceptable, et atteint 1 quand toutes les réponses sont à leur valeur désirée.

Remarque:

La fonction de désirabilité est définie sur l'intervalle  $(0,1)$ . L'avantage de cette définition c'est que dans le cas stochastique la désirabilité peut être considérée comme la probabilité d'avoir la valeur spécifiée.



# **QUALITÉ DE LA RÉPARTITION OPTIMALE**

## **DE PUISSANCE DANS LES RÉSEAUX**

### **3.1 Généralités**

Le problème de la répartition optimale de puissance se pose lorsque deux ou plusieurs unités de production sont en service. Le problème est de savoir comment répartir de manière optimale la puissance demandée entre les groupes de production.

La méthode intuitive adoptée depuis les années 20 [Davison G. R. 1922] consistait à diviser la demande totale de puissance entre les groupes de manière à ce que le coût de production en dollars/kW-Heure soit le même pour toutes les unités en service. Cette méthode a donné de très bons résultats [Stahl E. C. 1931] et elle continue de s'appliquer dans les réseaux qui ne sont pas encore équipés d'un dispatching économique.

La première formulation mathématique du problème de répartition optimale de puissance est apparue vers les années 30 [Steinberg M. J., Smith T. H. 1934] sous forme d'une fonction objective coût avec contrainte égalité (bilan de puissance) pondérée par le coefficient de Lagrange. La résolution du problème a donné une confirmation de la méthode intuitive.

L'apparition du théorème de Kuhn-Tucker [Kuhn H. W., Tucker A. W. 1951] dans les années 50 en optimisation, a permis une généralisation du problème aux contraintes inégalités ce qui a conduit Carpentier [Carpentier J. 1962] (Électricité de France) à élaborer la première formulation mathématique complète du problème de répartition optimale de puissance sous forme d'un problème d'optimisation non linéaire sous contraintes utilisées de nos jours.

Cependant la solution de la formulation complexe de Carpentier n'a vu le jour qu'après la révolution numérique des années 70 où le premier algorithme efficace et définitif de répartition optimale de puissance fut présentée par Dommel et Tinney [Dommel H. W., Tinney W. F. 1968]. L'algorithme calcule la répartition de puissance par la méthode de Newton pour déterminer une solution faisable, et il minimise la fonction coût par la méthode de gradient en utilisant la solution précédente pour les conditions initiales.

Actuellement, on assiste à plus de 300 algorithmes [Happ H. H. 1976], [Huneault M., Galiana F. D. 1991] dans le domaine, utilisant différentes méthodes d'optimisation [Sasson A. M., Merrill H. M. 1974] et traitant de plusieurs considérations pratiques.

### 3.2 Équations de répartition de puissance

Le régime permanent sinusoïdal qui s'établit dans un réseau électrique parcouru par du courant alternatif peut être modélisé par un système d'équation linéaire de la forme:

$$I = YV \quad (3.1)$$

avec:

$Y$  : la matrice des admittances nodales du réseau.

$I$  : le vecteur des courants injectés aux noeuds.

$V$  : le vecteur des tensions aux noeuds.

Pour un réseau de  $N$  noeuds, le courant injecté  $I_i$  au noeud  $i$  est:

$$I_i = Y_{ii} V_i + \sum_{k \neq i}^N Y_{ik} V_k \quad i = 1, \dots, N \quad (3.2)$$

Au système (3.2) on préfère généralement un modèle faisant intervenir les puissances actives  $P_i$  et réactives  $Q_i$  injectées au noeud  $i$ . Soit:

$$\begin{aligned}
 P_i &= \operatorname{Re}(V_i I_i^*) \\
 Q_i &= -\operatorname{Im}(V_i I_i^*)
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

En posant:

$$V_i = V_i / \theta_i \quad \text{et} \quad Y_{ij} = Y_{ij} / \beta_{ij}$$

on a:

$$\begin{aligned}
 P_i &= V_i \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j \cos(\theta_i - \theta_j - \beta_{ij}) \\
 Q_i &= V_i \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j \sin(\theta_i - \theta_j - \beta_{ij})
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Le système (3.4) s'écrit sous la forme condensée suivante:

$$P = \varphi(\theta, V)$$

$$Q = \psi(\theta, V)$$

où  $P$ ,  $Q$ ,  $\theta$  et  $V$  sont des vecteurs de dimension  $N$  ayant respectivement pour composantes  $P_i$ ,  $Q_i$ ,  $\theta_i$ , et  $V_i$ ,  $i=1, \dots, N$ .

### 3.3 Formulation générale

L'optimisation des puissances dans les réseaux électriques peut être formulée sous la forme générale d'un problème d'optimisation non linéaire [Carpentier 1962] avec contraintes qui consiste à minimiser une fonction des variables  $P$ ,  $Q$ ,  $\theta$  et  $V$ , tout en respectant les équations de fonctionnement du réseau et les limites sur les variables. Soit:

$$\text{Min } f(P, Q, \theta, V)$$

SC:

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad & P = \varphi(\theta, V) \\ \text{b)} \quad & Q = \psi(\theta, V) \\ \text{c)} \quad & g(P, Q, \theta, V) \leq 0 \\ \text{d)} \quad & P_m \leq P \leq P_M \\ \text{e)} \quad & Q_m \leq Q \leq Q_M \\ \text{f)} \quad & V_m \leq V \leq V_M \end{aligned} \tag{3.5}$$

avec:

$P, Q$  : les puissances (actives et réactives) injectées aux noeuds.

$V, \theta$  : les tensions (modules, phases) aux noeuds.

$P_m, Q_m$  et  $V_m$  : les limites inférieures des  $P$ ,  $Q$  et  $V$ .

$P_M, Q_M$  et  $V_M$  : les limites supérieures des  $P$ ,  $Q$  et  $V$ .

Les égalités a et b dans (3.5) correspondent aux équations de répartition. L'inégalité c représente les transits (courants admissibles  $I(P, Q, V, \theta) \leq I_{\max}$ ) sur les lignes.

La formulation (3.5) est générale. Les contraintes à respecter dépendent de l'objectif visé (minimisation du coût de génération ou des pertes).

### 3.4 Classes d'optimisation de puissance

La puissance active générée par les groupes de production se répartit entre la consommation active et les pertes dans les résistances des lignes de transmission. Comme les pertes actives dépendent essentiellement des niveaux de tensions et que ces dernières sont liées aux transits réactifs sur les lignes, on distingue donc deux classes d'optimisation de puissance:

- la minimisation du coût de génération active (dispatching économique)[Dommel H. W., Tinney W. F. 1968].

- la minimisation des pertes actives (optimisation du profil de tension)[El-Kady M. A., Bell B. D. 1986].

La formulation mathématique de chaque classe d'optimisation peut être déduite de la formulation générale.

### 3.4.1 Le dispatching économique

Si on désigne par  $P_g$  la puissance fournie par le groupe  $g$  raccordé au noeud  $i$ , et  $P_{di}$  la puissance consommée au noeud  $i$ , la puissance active injectée au noeud  $i$  est:

$$P_i = P_{gi} - P_{di} \quad (3.6)$$

Le coût de production d'un groupe thermique  $g$  en fonction de la puissance active fournie  $P_g$  peut être représenté par une courbe convexe modélisée par l'expression [El-Hawary M. E., Mbamalu G. A. N. 1987] :

$$C_g = \alpha_g + \beta_g P_g + \gamma_g P_g^2 \quad (3.7)$$

Le problème de dispatching économique consiste à minimiser le coût de production  $C_T$  de l'ensemble des groupes  $G$ . Soit:

$$C_T = \sum_{g \in G} C_g \quad (3.8)$$

sous les contraintes égalités (3.5a), (3.5b), (3.6) et inégalités (3.5c), (3.5d), (3.5e), (3.5f).

### 3.4.2 Optimisation du plan de tension

Pour l'optimisation du plan de tension on souhaite que la puissance active injectée au noeud  $i$  soit fixée à une valeur donnée  $P_{oi}$ , et on cherche à réaliser l'équilibre[Blanchon 1991]:

$$\sum_{i=1}^N P_i = \pi \quad (3.9)$$

où  $\pi$  représente les pertes actives de transmission dans les lignes.

En pratique l'équation (3.9) est assurée grâce aux régulateurs automatiques de vitesse des groupes de production. La loi de réglage des groupes est généralement de la forme[Blanchon 1991]:

$$P_i = P_{oi} + \lambda_i p \quad \text{pour } i \in G$$

avec

$$\lambda_i > 0 \quad \text{et} \quad \sum \lambda_i = 1$$

(3.10)

On a donc:



$$P = P_{\pi} - \sum_{i=1}^N P_{oi} \quad (3.11)$$

La puissance réactive injectée au noeud  $i$  sera de la forme:

$$Q_i = Q_{gi} + C_i - S_i - Q_{di} \quad (3.12)$$

où

$Q_{gi}$  représente la puissance réactive injectée par le groupe  $g$  au noeud  $i$ .  $Q$  la consommation réactive.  $C_i$  et  $S_i$  des variables artificielles pour que le problème ait toujours une solution, et qui peuvent être interprétées comme le volume global de condensateurs et de bobines supplémentaires à installer au noeud  $i$  pour avoir un fonctionnement du réseau dans les limites de tensions admissibles.

Le problème d'optimisation du plan de tension consiste à minimiser une fonction de la forme:

$$F = \alpha P + \beta \sum_{i=1}^N C_i + \gamma \sum_{i=1}^N S_i \quad (3.13)$$

sous les contraintes (3.5a), (3.5b), (3.7) et inégalité (3.5e), (3.5f)

**Remarque:**

Nous avons exposé le principe général de la répartition optimale de puissance. Notre objectif dans ce chapitre est l'analyse qualitative de la répartition optimale de puissance. Le lecteur trouvera dans les références [ Happ 1977, Stott 1987, Huneault 1991] les détails sur les algorithmes et les techniques d'optimisation utilisées dans le domaine

### 3.5 Performances du profil de tension

Dans ce paragraphe, nous appliquons la procédure proposée pour optimiser les performances du profil de tension d'un réseau électrique.

#### 3.5.1 Exemple

Soit le réseau de 4 noeuds de la figure 3.1.

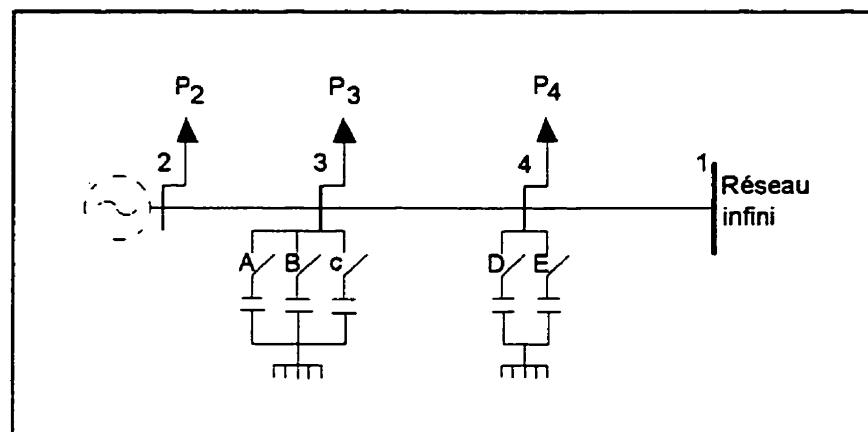


Figure 3.1 : Réseau de 4 noeuds.

Les impédances des lignes et les puissances des charges du réseau ci-dessus pour les grandeurs de base  $U_b=230\text{KV}$  et  $S_b=100\text{MVA}$  sont présentées dans les tableaux 3.1 et 3.2.

Tableau 3.1: Impédances des lignes.

Ligne	Impédance (pu)
$L_{23}$	$0.01 + j0.10$
$L_{34}$	$0.02 + j0.20$
$L_{41}$	$0.015 + j0.15$

Tableau 3.2: Puissances des charges.

Charge	Puissance (MVA)
$P_2$	20
$P_3$	$40 + j10$
$P_4$	$30 + j15$

Les tensions des noeuds obtenues par un algorithme de répartition de puissance pour les conditions de charges précédentes sont présentées au tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Tensions.

Noeud	Module (pu)	Phase (deg)
1	1.0000	0.0000
2	0.9377	-5.2857
3	0.9303	-6.6187
4	0.9567	-4.2345

On désire relever le plan de tension (tableau 3.3) du réseau à un niveau acceptable par des actions sur les compensateurs  $C_3$  et  $C_4$  raccordés aux noeuds 3 et 4 en utilisant l'approche qualitative proposée.

### **3.5.2 Spécification des performances**

La première étape de la procédure consiste à spécifier les performances désirées pour les tensions aux noeuds. Supposons que l'exploitant de ce réseau désire des tensions de l'ordre de 1pu ou légèrement supérieures. La résolution classique de ce problème consiste à imposer des contraintes sur les tensions et calculer les valeurs des contrôles qui donnent les tensions fixées. L'inconvénient de cette approche c'est qu'elle ne représente pas adéquatement les spécifications de l'exploitant. Ce dernier désire des tensions de l'ordre de 1pu ou légèrement supérieures sans spécifier de valeurs exactes. Car l'exploitant est conscient que pour chaque valeur spécifiée il y a un certain coût (quantité d'injection réactive, nombre de manoeuvres, pertes actives,...) et le choix d'une certaine valeur sans avoir une connaissance préalable de ce coût n'est pas un choix optimal. C'est pourquoi en pratique on préfère une certaine flexibilité dans la formulation des objectifs et les seules contraintes admises sont opérationnelles (comme les limites des variables).

Nous remédions à ce problème par la fonction de désirabilité. Ainsi nous représentons les spécifications précédentes de l'exploitant par la courbe de la figure 3.2.

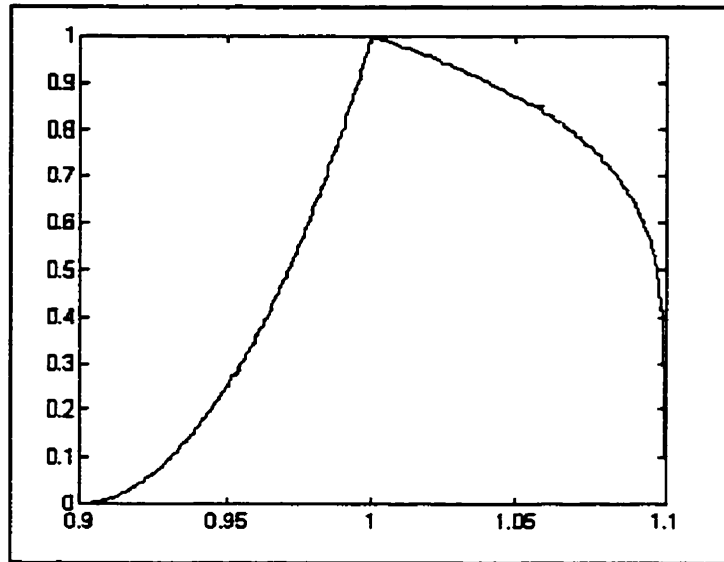


Figure 3.2: Désirabilité du profil de tension

Sans perte de généralité nous prenons la même fonction de désirabilité pour les trois tensions  $V_2$ ,  $V_3$  et  $V_4$  des noeuds 2, 3 et 4.

La courbe de la figure 3.2 peut être modélisé par l'expression (2.10 chapitre 2) avec  $s=5$  et  $t=0.2$ . Soit:

$$d(v_i) = \begin{cases} \left( \frac{v_i - 0.9}{0.1} \right)^5 & 0.9 \leq v_i \leq 1 \\ \left( \frac{1.1 - v_i}{0.1} \right)^{0.2} & 1 \leq v_i \leq 1.1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.14)$$

où  $v_i$  ( $i=1,2,3$ ) la tension du noeud  $i$ .

Pour optimiser simultanément les trois tensions (nœuds 2,3 et 4) sans pénaliser une tension par rapport à l'autre et en assurant une certaine coordination entre les trois performances nous utilisons la désirabilité globale D. Soit:

$$D(v_2, v_3, v_4) = (d(v_1) d(v_2) d(v_3))^{1/3} \quad (3.15)$$

### 3.5.3 Optimisation

La deuxième étape de la procédure consiste à optimiser la désirabilité globale D.

Pour cela nous considérons deux cas:

#### 1) Cas statique

Dans le cas où les variations statistiques des charges sont négligées, les injections réactives  $C_3$  et  $C_4$  aux nœuds 3 et 4 recherchées sont celles qui maximisent D.

#### Remarque:

Les difficultés de maximiser D analytiquement résident dans:

- l'expression  $D=f(C_3, C_4)$  est relativement complexe
- D n'est pas convexe
- le maximum est un point anguleux ( D non dérivable en l ).
- les contrôles sont discrets

Nous remédions à ce problème par les tableaux orthogonaux .

Les facteurs de contrôle sont  $C_3$  et  $C_4$  (figure 3.1).  $C_3$  est formé de trois éléments de 100 Mvars chacun ( $A=B=C=100\text{Mvars}$ ), ce qui donne 4 niveaux d'injection possibles 0, 100, 200 et 300 Mvars pour  $C_3$ .

$C_4$  contient deux éléments de 150 Mvars chacun ( $D=E=150\text{ Mvars}$ ).  $C_4$  a 3 niveaux 0, 150 et 300Mvars.

Le nombre factoriel correspondant à ces deux facteurs est  $3^1 \times 4^1 = 12$ .

Les 12 combinaisons possibles de  $C_3$  et  $C_4$  sont présentées dans le tableau 3.4 où les éléments 0, 1, 2, 3 du tableau 3.4 indique les niveaux des facteurs.

Tableau 3.4: Le plan factoriel de  $C_3$  et  $C_4$ .

No	Condensateurs	
	$C_4$	$C_3$
1	0	0
2	0	1
3	0	2
4	0	3
5	1	0
6	1	1
7	1	2
8	1	3
9	2	0
10	2	1
11	2	2
12	2	3



Les valeurs de D obtenues en exécutant l'algorithme de répartition de puissance pour les 12 combinaisons du tableau 3.4 sont dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5: Désirabilité.

No	Condensateurs		Désirabilité
	$C_4$	$C_3$	
1	0	0	.2022
2	0	1	.5730
3	0	2	.8816
4	0	3	.8901
5	1	0	.4762
6	1	1	.9426
<u>7</u>	1	2	.9958
8	1	3	.8819
9	2	0	.8015
10	2	1	.9781
11	2	2	.9127
12	2	3	.7544

Dans le tableau 3.5, la désirabilité est maximale pour la solution 7. Cette solution correspond à la combinaison (1,2) c.à.d aux injections  $C_3=200\text{Mvars}$  et  $C_4=150\text{Mvars}$ .

Les tensions correspondantes à cette solution sont présentées dans le tableau 3.6. Nous constatons que le profil de tension obtenu (tableau 3.6) répond aux spécifications établies sans aucune violation de contraintes. Rappelons que les violations de contraintes se traduisent par une valeur nulle de la fonction de désirabilité.

**Tableau 3.6: Tension pour une  
désirabilité maximale.**

Noeud	Module	Phase
1	1.000	0.00
2	1.000	-5.3058
3	1.005	-6.5095
4	0.998	-4.2702

Remarque:

La solution 7 ci-dessus obtenue en appliquant la procédure qualitative proposée n'a qu'une importance relative. Car la procédure donne à l'opérateur le degré de performance des 12 solutions (tableau 3.5). Ceci permet à l'opérateur de juger toutes les solutions et de choisir celle qui satisfait le mieux ses exigences. Par exemple la solution 3 a une désirabilité inférieure à celle de la solution 7 mais elle n'exige que 200Mvars et la manoeuvre d'un seul facteur de contrôle(  $C_3$  ). L'opérateur peut opter pour cette solution.

Les résultats obtenus dans le tableau 3.5 nous donne l'effet de chaque facteur sur la performance de la solution en fonction de la position de l'autre. Une représentation graphique de la fonction de désirabilité nous donnent l'état global de la performance et les combinaisons les plus efficaces. Pour visualiser cela, nous avons représenté dans la figure 3.3 la désirabilité D en fonction de  $C_3$  pour les différents niveaux de  $C_4$  et inversement dans la figure 3.4.

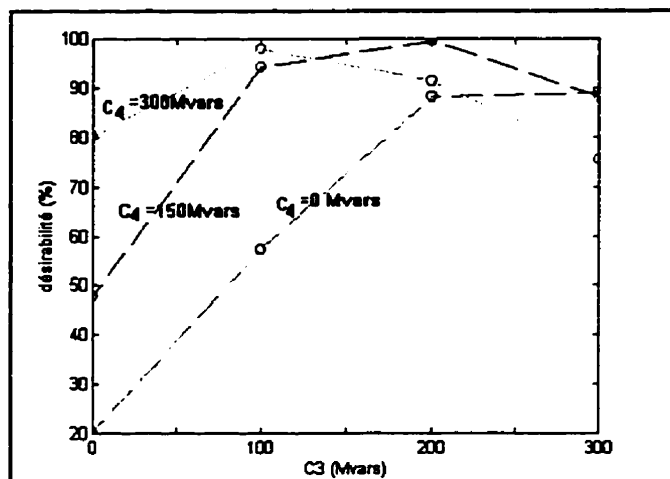


Figure 3.3: Désirabilité D en fonction de  $C_3$  pour les trois valeurs de  $C_4$ .

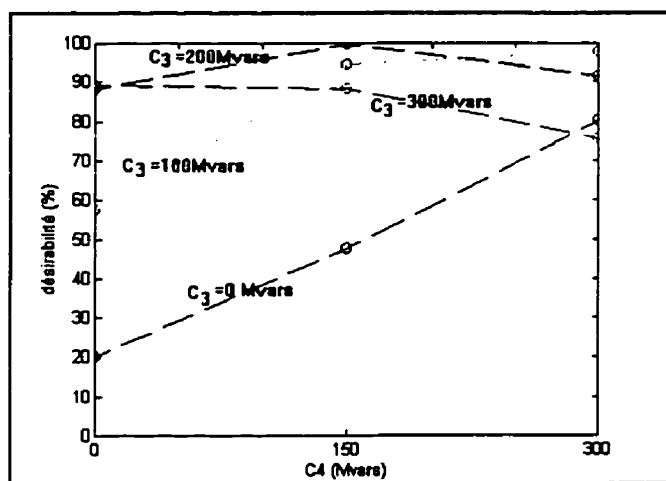


Figure 3.4: Désirabilité D en fonction de  $C_4$  pour les quatre valeurs de  $C_3$ .

## 2) Cas stochastique

Dans le cas des variations statistiques des charges, la désirabilité  $D$  devient stochastique. La solution performante est celle qui maximise la désirabilité moyenne  $D_{\text{moy}}$  et minimise la variance  $D_{\text{var}}$ .

Les difficultés de résoudre analytiquement ce problème sont:

- D est stochastique.
- la fonction de distribution de  $D$  n'est connue.
- problème d'optimisation simultanée de deux objectifs
- les difficultés mentionnées dans la remarque précédente.

Nous utilisons l'estimateur de performance de Taguchi. Soit le rapport signal/bruit correspondant à la performance recherchée:

$$\eta = 10 \log_{10} \left( \frac{D_{\text{moy}}^2}{D_{\text{var}}} \right) \quad (3.16)$$

La valeur des injections réactives  $C_3$  et  $C_4$  solution est celle qui maximise le rapport signal/bruit  $\eta$ .

Nous prenons pour les facteurs bruit les charges  $P_2$ ,  $P_3$  et  $P_4$  des noeuds 2,3 et 4 et nous modélisons le bruit des charges par la variance autour la puissance nominale (comme nous avons expliqué dans l'exemple du paragraphe 2.8 page 33). C.à.d chaque charge peut prendre et de manière aléatoire trois valeurs (ou niveaux)  $P_i - \Delta P_i$ ,  $P_i$ ,  $P_i + \Delta P_i$  ( $i=2, 3, 4$ ). On a donc trois facteurs à trois niveaux de bruit.

Nous affectons les trois charges aux colonnes 1, 2 et 3 du tableau 3.7. Les chiffres  $(-1,0,1)$  du tableau 3.7 représentent les 3 niveaux des charges.

Tableau 3.7:  $OA_9(3^3)$  représentant les variations statistiques des charges.

No	Charges		
	$P_2$	$P_3$	$P_4$
1	-1	-1	-1
2	-1	0	0
3	-1	1	1
4	0	-1	0
5	0	0	1
6	0	1	-1
7	1	-1	1
8	1	0	-1
9	1	1	0

Nous évaluons les performances caractéristiques ( $D_{\text{moy}}$ ,  $D_{\text{var}}$  et le rapport signal/bruit  $\eta$ ) de chaque solution (tableau 3.4) pour les 9 combinaisons des charges (tableau 3.7 représentant le bruit).

Pour une variation de 10% des charges nous avons les résultats du tableau 3.8.

Tableau 3.8: Performances caractéristiques du profil de tension pour différentes positions des contrôles.

No	$C_4$	$C_3$	$D_{\text{moy}}$	$D_{\text{var}}$	$\eta$
1	0	0	.1628	.2758E-01	15.4203
2	0	1	.5140	.4213E-01	21.7275
3	0	2	.8663	.9641E-02	39.0703
4	0	3	.8934	<u>.3010E-02</u>	49.4240
5	1	0	.4187	.4145E-01	20.0885
6	1	1	.8864	.4618E-01	25.6631
7	1	2	<u>.9848</u>	.1025E-01	39.6525
8	1	3	.9024	.1467E-01	35.7795
9	2	0	.7484	.3943E-01	25.5268
10	2	1	.9771	.3210E-02	<u>49.6680</u>
11	2	2	.9325	.1405E-01	36.4425
12	2	3	.7776	.1652E-01	33.4541

Le tableau 3.8 nous donne les performances des 12 solutions considérées. Ainsi la solution 7 ( $C_3=200$  Mvars,  $C_4=150$  Mvars) correspond à la désirabilité moyenne maximale.

La solution 4 ( $C_3=300$  Mvars  $C_4=0$  Mvars) correspond à la variance minimale. Le compromis entre les deux performances est la solution 10 qui maximise le rapport signal/bruit. La solution 10 représente une injection de 100Mvars au noeud 3 et 300 Mvars au noeud 4.

Le profil des tensions obtenu pour cette solution est présenté au tableau 3.9.

Tableau 3.9: Tensions pour un s/b maximal.

Noeud	Module (pu)	Phase (deg)
1	1.0000	0.0000
2	1.0090	-5.2479
3	1.0122	-6.4596
4	1.0180	-4.2994

### 3.6 Optimisation des performances des pertes

Nous avons vu au paragraphe 3.4 que les deux objectifs de la répartition optimale de puissance sont la minimisation du coût de génération et des pertes actives. Les algorithmes de répartition de puissance[EL-Hawary M. E., Mbamalu G. A. 1991], [Christensen G. S., El-Hawary M. E. 1987] qui minimisent le coût de génération n'optimisent pas les pertes actives. Dans ce paragraphe, nous utilisons la procédure proposée pour optimiser les performances des pertes actives de la solution des algorithmes qui minimisent le coût de génération en incluant une certaine robustesse aux variations statistiques des charges[Bounou M., Lefebvre S., Do X-Dai 1995].

Soit le réseau IEEE 30 noeuds (figure 3.5) dont les données sont présentées dans le tableau A1 de l'annexe A. Les puissances actives optimales (qui minimisent le coût de génération) calculées par Christensen[Christensen 1987] pour le réseau de la figure 3.5 et les données des tableaux A1 et A2 de l'annexe-A sont présentées dans le tableau A3. Les pertes actives correspondantes à cette solution optimale sont:

Tableau 3.10: Pertes actives dans le réseau IEEE-30 noeuds [Christensen 1987].

Pertes actives (MW)
8.46

Les pertes actives du tableau 3.10 correspondent au cas statique. Les informations



qualitatives comme la sensibilité de la solution aux variations des contrôles ou l'impact des variations statistiques des charges sur les pertes ne sont pas traitées par l'algorithme [Christensen G. S., El-Hawary M. E. 1987]. Nous utilisons la procédure proposée pour avoir les informations précédentes et nous optimisons les performances des pertes actives.

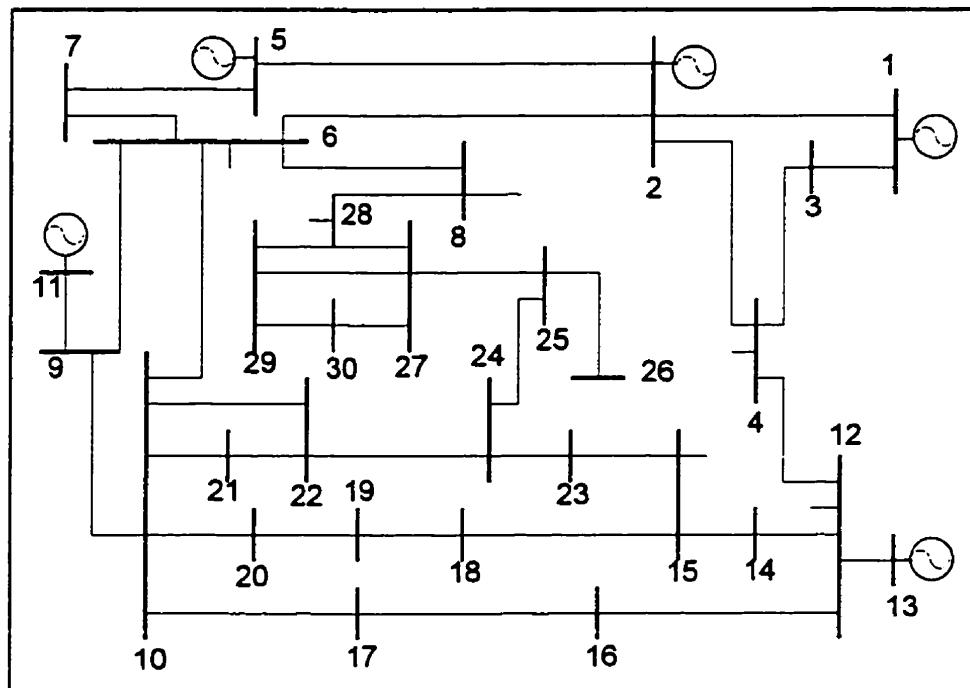


Figure 3.5 : Réseau IEEE-30 noeuds.

### 3.6.1 Spécifications

Nous spécifions pour les pertes actives la performance désirée *le plus petit est le meilleur*.

L'estimateur s/b correspondant à cette performance est:

$$\eta = -10 \log_{10} \left( \sum_j \pi_j^2 \right) \quad (3.17)$$

avec  $\pi_j$  les pertes actives sous le bruit  $j$ .

Comme les pertes actives dépendent essentiellement des transits de la puissance réactive sur les lignes nous prenons pour les facteurs de contrôles les injections réactives  $Q_2, Q_5, Q_{11}$  et  $Q_{13}$  aux noeuds 2, 5, 11 et 13 (figure 3.5) et nous affectons ces facteurs aux colonnes d'un tableau orthogonal.

Le choix du tableau orthogonal dépend du nombre d'essais qu'on veut effectuer. Ici nous nous limitons à 9 essais et nous choisissons le tableau 3.11 pour les facteurs de contrôle.

Tableau 3.11 :  $OA_9(3^4)$ .

Lignes	Contrôles			
	$Q_{13}$	$Q_{11}$	$Q_5$	$Q_2$
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0
3	-1	1	1	1
4	0	-1	0	1
5	0	0	1	-1
6	0	1	-1	0
7	1	-1	1	0
8	1	0	-1	1
9	1	1	0	-1

-Pour les facteurs bruit nous prenons les charges soumises à des variations statistiques. Ici nous choisissons arbitrairement les charges aux noeuds 2, 4, 5, 7, 8, 10, 13, 15, 17, 19, 21, 24 et 30 et nous les affectons aux 13 colonnes du tableau 3.12.

Tableau 3.12:  $OA_{27}(3^{13})$ .

No	Paramètres												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	-1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1
5	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1
6	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-1	0	0	0
7	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	0	0	0
8	-1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	1	1	1
9	-1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1
10	0	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
11	0	-1	0	1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1
12	0	-1	0	1	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0
13	0	0	1	-1	-1	0	1	0	1	-1	1	-1	0
14	0	0	1	-1	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1
15	0	0	1	-1	1	-1	0	-1	0	1	0	1	-1
16	0	1	-1	0	-1	0	1	1	-1	0	0	1	-1
17	0	1	-1	0	0	1	-1	-1	0	1	1	-1	0
18	0	1	-1	0	1	-1	0	0	1	-1	-1	0	1
19	1	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0
20	1	-1	1	0	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1
21	1	-1	1	0	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1
22	1	0	-1	1	-1	1	0	0	-1	1	1	0	-1
23	1	0	-1	1	0	-1	1	1	0	-1	-1	1	0
24	1	0	-1	1	1	0	-1	-1	1	0	0	-1	1
25	1	1	0	-1	-1	1	0	1	0	-1	0	-1	1
26	1	1	0	-1	0	-1	1	-1	1	0	1	0	-1
27	1	1	0	-1	1	0	-1	0	-1	1	-1	1	0

Les éléments -1, 0, 1 des tableaux 3.11 et 3.12 correspondent aux niveaux des

facteurs obtenus en supposant une variation de  $\pm 10\text{Mvars}$  dans valeurs initiales des contrôles (tableau A3 de l'annexe A) et de  $\pm 5\%$  dans les valeurs des charges (tableau A2 de l'annexe A).

### 3.6.2 Optimisation

Nous évaluons le rapport s/b pour les différentes combinaisons de contrôle sous le bruit supposé. Pour réduire le temps de simulation nous utilisons l'approximation linéaire suivante:

$$\Delta \begin{bmatrix} V \\ \theta \end{bmatrix} = J^{-1} \Delta \begin{bmatrix} Q \\ P \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

où J est le Jaccobien de la solution initiale.

Les performances moyenne et rapport signal/bruit des pertes pour les différents niveaux des contrôles et du bruit supposé sont présentés dans le tableau 3.13.

D'après les résultats du tableau 3.13, la solution 8 a un rapport s/b maximal. Cette solution correspond à un compromis optimal entre les deux performances caractéristiques recherchées pour les pertes (moyenne et variance minimales).

**Tableau 3.13: Les performances caractéristiques des pertes actives.**

<b>Cas</b>	<b>Pertes (MW)</b>	<b>s/b</b>
1	8.8082	21.1022
2	8.7649	21.1451
3	8.7547	21.1552
4	8.5286	21.3824
5	9.2034	20.7210
6	8.5618	21.3487
7	8.9131	20.9994
<u>8</u>	<u>8.3625</u>	<u>21.5532</u>
9	8.9328	20.9798

Pour comparer les performances des pertes de la solution 8 (obtenue par cette procédure) avec la solution initiale nous avons évalué les pertes et le rapport s/b sous les mêmes conditions de variations de charges pour les deux solutions (tableau 3.14). Nous constatons que l'estimateur de performance (s/b) est meilleur pour la solution 8 et par conséquent les pertes actives ont diminué de 2% (tableau 3.14).

**Tableau 3.14 : Performances des pertes actives de la solution initiale et de la solution améliorée.**

	Pertes (MW)	s/b
Solution initiale	8.5179	21.3933
Solution améliorée	8.3620	21.5538

La solution 8 obtenue par cette procédure correspond (d'après le tableau 3.11) à la combinaison (1, 0, -1, 1). Cette combinaison nous donne les contrôles à ajuster. C.à.d pour avoir la solution 8, il faut augmenter l'injection réactive au noeud 2 et 13 et la réduire au noeud 5 de la quantité supposée (10Mvars).

### 3.6.3 Validation des résultats

L'analyse ci-dessus est faite pour les 9 combinaisons du tableau 3.11 extrait des 81 combinaisons possibles ( 4 facteurs de contrôle à 3 niveaux donnent  $3^4 = 81$  combinaisons) du tableau 3.15. Pour estimer l'impact de cette réduction sur les résultats nous avons évalué les pertes et le rapport s/b pour toutes les combinaisons du tableau 3.15. Les résultats de cette analyse exhaustive sont présentés dans le tableau 3.16.

Tableau 3.15: Plan factoriel complet de 4 facteurs à 3 niveaux  
 ( \* indique les 9 combinaisons OA<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>). )

No	Q <sub>13</sub>	Q <sub>11</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>2</sub>	No	Q <sub>13</sub>	Q <sub>11</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>2</sub>	No	Q <sub>13</sub>	Q <sub>11</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>2</sub>
1 *	-1	-1	-1	-1	28	0	-1	-1	-1	55	1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	0	29	0	-1	-1	0	56	1	-1	-1	0
3	-1	-1	-1	1	30	0	-1	-1	1	57	1	-1	-1	1
4	-1	-1	0	-1	31	0	-1	0	-1	58	1	-1	0	-1
5	-1	-1	0	0	32	0	-1	0	0	59	1	-1	0	0
6	-1	-1	0	1	33 *	0	-1	0	1	60	1	-1	0	1
7	-1	-1	1	-1	34	0	-1	1	-1	61	1	-1	1	-1
8	-1	-1	1	0	35	0	-1	1	0	62 *	1	-1	1	0
9	-1	-1	1	1	36	0	-1	1	1	63	1	-1	1	1
10	-1	0	-1	-1	37	0	0	-1	-1	64	1	0	-1	-1
11	-1	0	-1	0	38	0	0	-1	0	65	1	0	-1	0
12	-1	0	-1	1	39	0	0	-1	1	66 *	1	0	-1	1
13	-1	0	0	-1	40	0	0	0	-1	67	1	0	0	-1
14 *	-1	0	0	0	41	0	0	0	0	68	1	0	0	0
15	-1	0	0	1	42	0	0	0	1	69	1	0	0	1
16	-1	0	1	-1	43 *	0	0	1	-1	70	1	0	1	-1
17	-1	0	1	0	44	0	0	1	0	71	1	0	1	0
18	-1	0	1	1	45	0	0	1	1	72	1	0	1	1
19	-1	1	-1	-1	46	0	1	-1	-1	73	1	1	-1	-1
20	-1	1	-1	0	47 *	0	1	-1	0	74	1	1	-1	0
21	-1	1	-1	1	48	0	1	-1	1	75	1	1	-1	1
22	-1	1	0	-1	49	0	1	0	-1	76 *	1	1	0	-1
23	-1	1	0	0	50	0	1	0	0	77	1	1	0	0
24	-1	1	0	1	51	0	1	0	1	78	1	1	0	1
25	-1	1	1	-1	52	0	1	1	-1	79	1	1	1	-1
26	-1	1	1	0	53	0	1	1	0	80	1	1	1	0
27 *	-1	1	1	1	54	0	1	1	1	81	1	1	1	1

Tableau 3.16: Performances des pertes pour les combinaisons du tableau 3.15.

No	Pertes	s/b	No	Pertes	s/b	No	Pertes	s/b
1	8.8082	21.1022	28	8.7698	21.1402	55	8.7407	21.1690
2	8.6001	21.3099	29	8.5617	21.3488	56	8.5326	21.3784
3	8.4292	21.4843	30	8.3908	21.5239	57	8.3657	21.5452
4	8.9999	20.9152	31	8.9615	20.9524	58	8.9333	20.9797
5	8.7649	21.1451	32	8.7265	21.1832	59	8.6982	21.2114
6	8.5670	21.3434	33	8.5286	21.3824	50	8.5003	21.4113
7	9.2418	20.6849	34	9.2034	20.7211	61	9.1751	20.7478
8	8.9797	20.9347	35	8.9413	20.9719	62	8.9131	20.9994
9	8.7549	21.1549	36	8.7165	21.1931	63	8.6882	21.2213
10	8.8082	21.1018	37	8.7698	21.1432	64	8.7416	21.1682
11	8.6001	21.3099	38	8.5617	21.3488	65	8.5334	21.3775
12	8.4292	21.4842	39	8.3908	21.5239	66	8.3625	21.5532
13	8.9999	20.9152	40	8.9615	20.9523	67	8.9318	20.9812
14	8.7649	21.1451	41	8.5179	21.3933	68	8.6982	21.2114
15	8.5670	21.3434	42	8.5286	21.3824	69	8.5003	21.4112
16	9.2418	20.6849	43	9.2034	20.7210	70	9.1751	20.7477
17	8.9798	20.9347	44	8.9414	20.9719	71	8.6760	21.2336
18	8.7550	21.1549	45	8.7166	21.1931	72	8.6883	21.2213
19	8.8083	21.1020	46	8.7699	21.1401	73	8.7416	21.1681
20	8.5999	21.3102	47	8.5618	21.3487	74	8.5335	21.3774
21	8.4289	21.4845	48	8.3908	21.5239	75	8.3468	21.5612
22	8.9997	20.9155	49	8.9616	20.9523	76	8.9332	20.9798
23	8.7646	21.1453	50	8.7265	21.1832	77	8.6981	21.2114
24	8.5667	21.3437	51	8.7265	21.1832	78	8.5003	21.4113
25	9.2415	20.6851	52	9.2034	20.7220	79	9.1912	20.7325
26	8.9795	20.9349	53	8.9414	20.9719	80	8.9130	20.9994
27	8.7547	21.1552	54	8.7166	21.1930	81	8.9130	20.9994



En considérant toutes les combinaisons, le rapport s/b est maximal pour la solution 75 (tableau 3.16). Les pertes actives sont de 8.3468 MW. Cette solution correspond à la combinaison 75 du tableau 3.15. Soit les injections de +10Mvars aux noeuds 13, 11, 2 et -10Mvars au noeud 5.

Pour conclure, nous résumons les résultats obtenus dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.17: Performances caractéristiques des pertes pour les trois solutions.

Solution	s/b	Pertes moyennes (MW)	Puissances (Mvars)			
			$Q_{13}$	$Q_{11}$	$Q_5$	$Q_2$
initiale	21.3933	8.5179	0	0	0	0
améliorée 1 (méthode des TO)	21.5532	8.3625	+10	0	-10	+10
améliorée 2 (analyse combinatoire)	21.5612	8.3468	+10	+10	-10	+10

Une analyse des résultats ci-dessus, nous permet de constater que l'amélioration obtenue par l'analyse exhaustive ne justifie pas l'effort demandé par cette approche. Cela nous permet de conclure que pour les grands réseaux où le nombre des facteurs à étudier est élevé, les tableaux orthogonaux sont une alternative intéressante à l'analyse combinatoire exhaustive.

### 3.7 Ajustements des contraintes

Lorsqu'une violation de contrainte est observée dans l'exploitation d'un réseau électrique, l'opérateur procède à des actions sur les variables de contrôle pour s'adapter à la contingence et ramener le réseau à une zone de fonctionnement sécuritaire. L'absence d'un critère lui permettant de sélectionner les contrôles à actionner parmi plusieurs possibilités rend la tâche de l'opérateur difficile. Dans ce qui suit, nous utilisons la procédure qualitative proposée pour ajuster les contraintes où le critère de sélection peut être une certaine performance que l'on veut donner à la solution[Bounou M., Lefevbre S., Do X-Dai 1992].

Pour illustrer cela, nous considérons le réseau 23 noeuds de la figure 3.6 dont les données sont présentées dans l'annexe B [El-Hawary M. E., Mbamalu G. A. 1991]. La répartition optimale de puissance calculée par El-Hawary[El-Hawary M. E., Mbamalu G. A. 1991] pour ce réseau et les données de l'annexe B donne le profil des tensions du tableau B2. La tension du noeud 20 (tableau B de l'annexe B) viole la contrainte (1.10 p.u.) admise pour les tensions. Pour adapter la tension du noeud 20 à sa contrainte, les ajustements des contrôles réactifs sont nécessaires. Cependant cela affecte les pertes actives. La procédure proposée dans ce mémoire permet à l'opérateur de faire les ajustements en assurant une certaine coordination entre les objectifs suivants:

- 1- ramener la tension du noeud 20 à l'intérieur de l'intervalle de tolérance sans causer de violation de contraintes sur les autres noeuds.
- 2- optimiser les pertes actives.
- 3- garantir une certaine robustesse de la solution aux variations statistiques des

charges.

Pour réaliser les objectifs spécifiés précédemment, nous procédons comme suit:

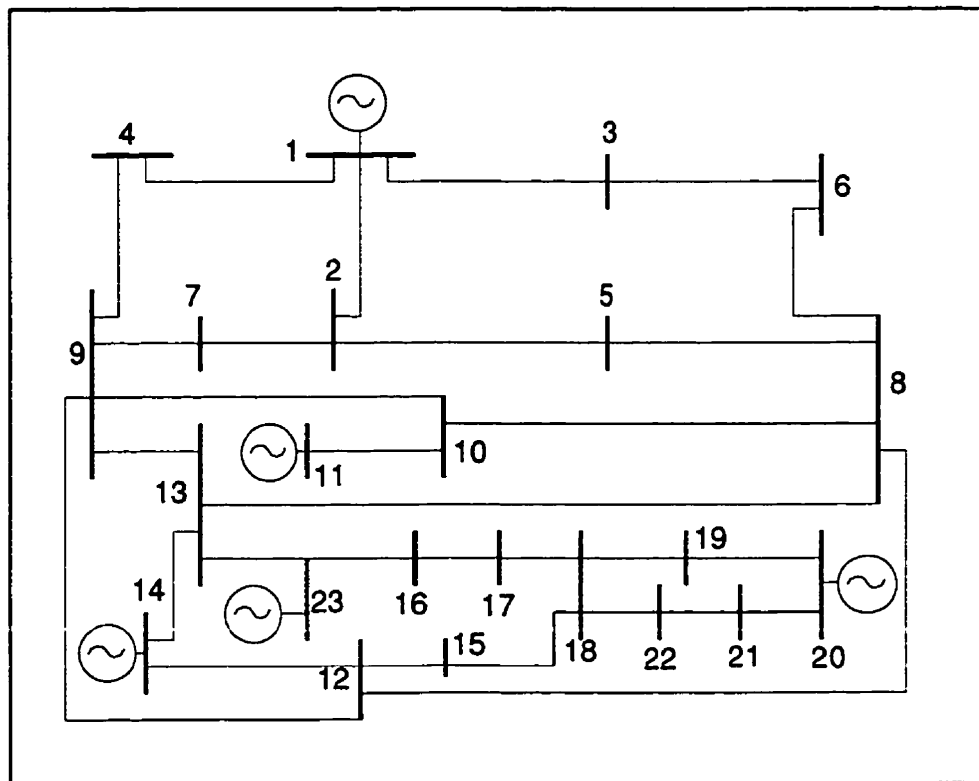


Figure 3.6: Réseau 23 noeuds[El-Hawary 1991].

Nous choisissons une fonction désirabilité binaire c.à.d qui a la valeur 1 s'il y a violation de contrainte et 0 dans le cas contraire. Cette fonction est obtenue à partir de la formule générale (2.10 chapitre 2) pour  $s=t=0$ .

Pour garantir une bonne performance des pertes, nous optimisons ces dernières d'une manière similaire à ce qui a été exposé au paragraphe précédent. C.à.d nous maximisons le rapport  $s/b$  correspondant à la performance désirée (*le plus petit le meilleur*) pour les pertes actives; et nous utilisons les mêmes tableaux orthogonaux : tableau 3.11 pour les contrôles réactifs et le tableau 3.12 pour les variations de charges.

Nous affectons les contrôles  $Q_{23}$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{14}$ ,  $Q_{11}$  (figure 3.6) aux colonnes 1, 2, 3, 4 du tableau 3.11 et les charges des noeuds 2, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 18, 19, 21 aux colonnes du tableau 3.12.

Les performances obtenues pour une variation de 2% des charges actives et réactives (tableau B1 de l'annexe B) et pour une variation  $\pm 20$  Mvars des valeurs de contrôles (tableau B4 de l'annexe B) sont présentées dans le tableau 3.18.

Tableau 3.18 : Désirabilité et performances caractéristiques des pertes actives.

No	Pertes (MW)	S/b	Désirabilité
1	126.7073	-2.0820	0
2	126.9864	-2.0658	0
3	126.9722	-2.0568	0
4	126.6064	-2.0428	1
5	126.4722	-2.0268	0
6	126.9573	-2.0820	0
7	<u>126.4822</u>	<u>-2.0368</u>	1
8	126.9873	-2.0820	0
9	126.7064	-2.0728	0

D'après les résultats (tableau 3.18), les solutions qui ne présentent pas de violation de contraintes ont une désirabilité de 1. Ces solutions sont 4, et 7. Parmi les deux possibilités la solution 7 a le meilleur rapport s/b. C.à.d la solution 7 donne les meilleures performances aux pertes actives.

Les ajustements des contrôles requis par la solution 7 sont donnés par la combinaison (1, -1, 1, 0) (tableau 3.11). Soient:

$$Q_{23} = +20\text{Mvars} \quad Q_{20} = -20\text{Mvars} \quad Q_{14} = +20\text{Mvars} \quad Q_{11} = 0\text{Mvars}$$

Pour valider ces résultats, nous avons calculé le profil des tensions du réseau par l'algorithme Load Flow pour les nouvelles valeurs de contrôles obtenues par la procédure.

Ainsi nous obtenons les tensions ci-dessous. Nous constatons (tableau 3.19) que toutes les tensions respectent les contraintes.

Tableau 3.19: Modules et phases des tensions après ajustement .

Noeud	module (pu)	Phase (rad)
1	1.060	0.00
2	0.983	-0.33
3	1.015	-0.08
4	0.980	-0.19
5	0.985	-0.40
6	0.971	-0.31
7	0.961	-0.38
8	1.001	-0.42
9	0.974	-0.39
10	0.979	-0.30
11	1.051	-0.13
12	1.044	-0.48
13	1.056	-0.42
14	1.088	-0.37
15	1.038	-0.63
16	1.041	-0.62
17	1.039	-0.67
18	1.055	-0.70
19	1.060	-0.73
20	1.093	-0.66
21	1.084	-0.72
22	1.067	-0.73
23	1.065	-0.53

### Conclusion:

La procédure proposée nous a permet d'ajuster les tensions sous les contraintes spécifiées: *le plus petit est le meilleur* pour les pertes et les variations statistiques des charges.

*Chapitre 4*

# **AJUSTEMENTS DES PARAMÈTRES D'UN** **STABILISATEUR ET PERFORMANCE DU** **RÉGLAGE**

## **4.1 Stabilité petit signal**

Un réseau électrique est constamment sollicité par des variations de charge ou des défauts. Ce qui donne naissance à un régime perturbé caractérisé par une variation des grandeurs tensions, courants et puissances transitées sur les lignes. L'amplitude et la durée de ces variations dépendent de l'importance de la sollicitation et de la capacité du réseau à absorber le choc.

Pour une perturbation sévère (défaut triphasé), la survie du système dépend essentiellement de la rapidité des organes de protection à intervenir pour le secourir. Les grandeurs accusent des variations brusques (non-linéaires) et l'étude du comportement du système durant cette phase est appelée *stabilité transitoire*[Kimbark E. W. 1955] .

Pour les petites perturbations, le réseau est appelé à se déplacer à l'intérieur de la zone de stabilité transitoire d'un point d'opération à un autre suivant un régime dynamique caractérisé par des oscillations autour du point d'équilibre[Bounou M., Lefebvre S., Malhamé R. 1991].

L'étude de ces oscillations est appelée *stabilité petit signal* par référence aux petites perturbations[Fouad A. A., Anderson P. M. 1977]. La stabilité du système durant la phase dynamique dépend du degré d'amortissement des oscillations. Généralement, les réseaux formés de lignes longues et compensées constituent un champ privilégié pour le développement et l'entretien de ces oscillations. Si des mesures adéquates ne sont pas prises pour amortir le système, les grandeurs tensions, courants et puissances s'amplifient et peuvent atteindre des amplitudes suffisantes pour actionner les organes de protection, entraînant ainsi le réseau dans la phase sévère de stabilité transitoire.

Les oscillations dynamiques dans un réseau sont sous-synchrones (de l'ordre de 1 Hz) et elles sont identifiées aux modes mécaniques des machines synchrones. Le moyen utilisé pour amortir ces oscillations est le stabilisateur (PSS). C'est un régulateur constitué d'une boucle de rétroaction où un signal dérivé de la vitesse, de la puissance ou de la tension passe à travers un correcteur pour s'ajouter à l'excitation de la machine. Le modèle dynamique de la machine synchrone[deMello F. P., Concordia C. 1969] avec stabilisateur est montré à la figure 4.1.



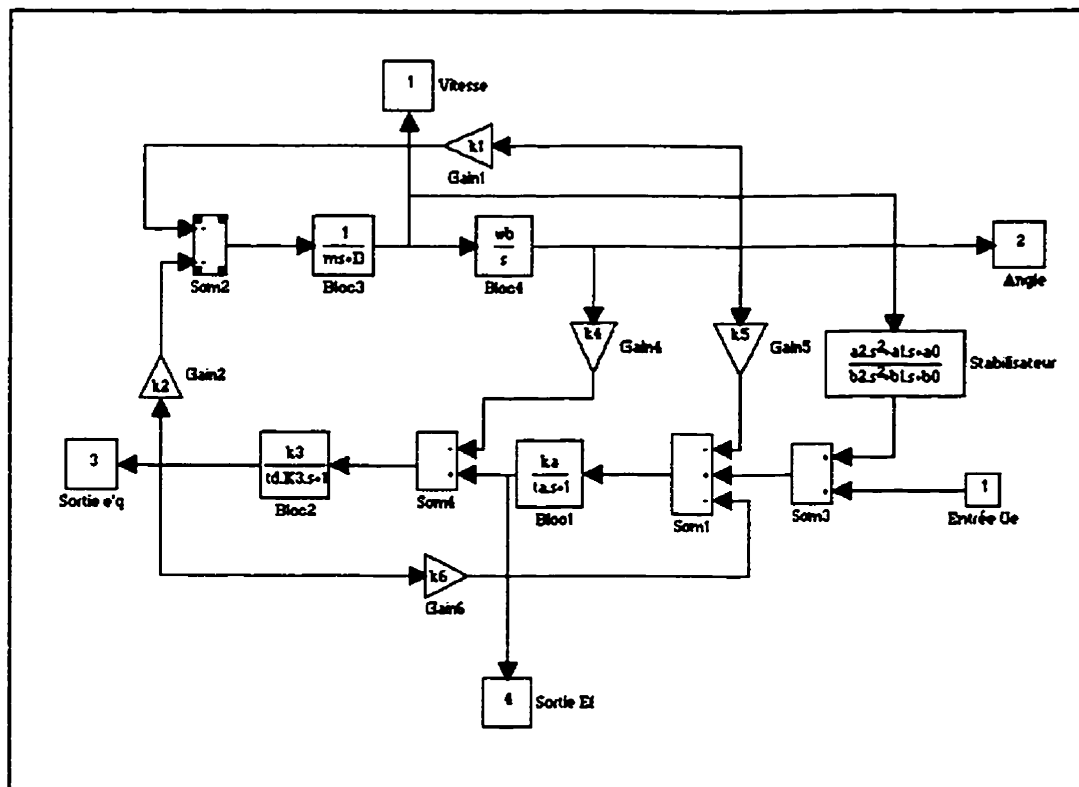


Figure 4.1: Diagramme bloc d'une machine synchrone avec stabilisateur.

## 4.2 Modèle dynamique d'un réseau mono-machine

### 4.2.1 Réseau mono-machine

Le modèle dynamique d'une machine synchrone reliée à un réseau infini (figure 4.2) s'obtient comme suit[Yu Y. 1983]:

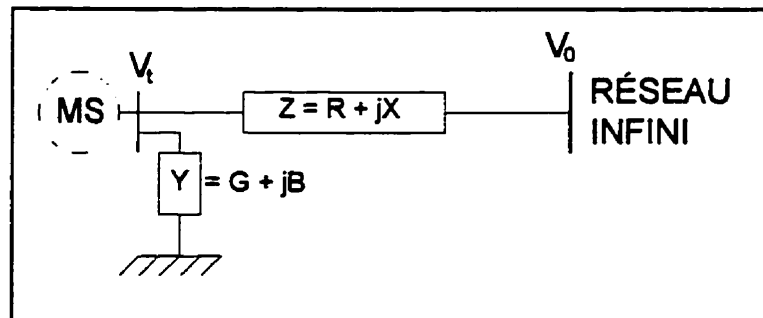


Figure 4.2: Machine synchrone reliée à un réseau infini

Les expressions de la tension et du courant de la machine en régime permanent sont:

$$V_t = E - jX_s I \quad (4.1)$$

$$I = YV_t + Z^{-1} (V_t - V_0) \quad (4.2)$$

où :

$I$  = courant de la machine.

$V_t$  = tension de la machine.

$E$  = force électromotrice.

$X_s$  = réactance synchrone.

$Z, Y$  = impédance et admittance du réseau d'interconnexion.

$V_0$  = tension du noeud du réseau infini.

L'équation (4.2) peut s'écrire :

$$ZI = (1 + ZY) V_t - V_0 \quad (4.3)$$

Posons :

$$\begin{aligned} I &= i_d + j i_q \\ V_t &= v_d + j v_q \\ V_0 &= V_0 (\sin(\delta) + j \cos(\delta)) \\ Z &= R + jX \\ Y &= G + jB \\ \delta &= \angle (e'_q, V_0) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Les tensions  $e'_q$ ,  $V_t$  et  $V_0$  dans les axes d et q sont montrées à la figure (4.3).

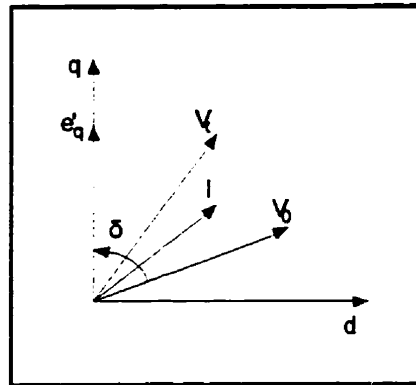


Figure 4.3: Grandeurs  $V_v e_q$  et  $V_0$  dans les axes d et q

Les équations (4.1) et (4.3) peuvent s'écrire sous les formes matricielles (4.5) et (4.6):

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e_q' - \begin{pmatrix} 0 & -x_q' \\ x_d' & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{pmatrix} R & -X \\ -X & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 & -C_2 \\ -C_2 & C_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} - V_0 \begin{pmatrix} \sin(\delta) \\ \cos(\delta) \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

avec  $C_1 = 1 + RG - XB$  et  $C_2 = XG + RB$

En substituant (4.5) dans (4.6), l'expression du courant est:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_d \\ Y_q \end{pmatrix} e_q' - \frac{V_0}{Z_e^2} \begin{pmatrix} R_2 & X_1 \\ -X_2 & R_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin(\delta) \\ \cos(\delta) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

avec:

$$\begin{aligned} R_1 &= R - C_2 X_d' & R_2 &= R - C_2 X_q' \\ X_1 &= X + C_1 X_q' & X_2 &= X - C_1 X_d' \\ Z_e^2 &= R_1 R_2 + X_1 X_2 & V_0 &= V_0 \angle \delta \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$Y_d = (C_1 X_1 - C_2 R_2) \frac{1}{Z_e^2} \quad Y_q = (C_1 R_1 + C_2 X_2) \frac{1}{Z_e^2}$$

L'expression linéarisée de l'équation (4.7) est:

$$\begin{pmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_d \\ Y_q \end{pmatrix} \Delta e_q' + \frac{V_0}{Z_e^2} \begin{pmatrix} -R_2 & X_1 \\ X_2 & R_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\delta_o) \\ \sin(\delta_o) \end{pmatrix} \Delta \delta \quad (4.9)$$

Soit:

$$\begin{pmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_d \\ Y_q \end{pmatrix} \Delta e_q' + \begin{pmatrix} F_d \\ F_q \end{pmatrix} \Delta \delta \quad (4.10)$$

$$\begin{pmatrix} F_d \\ F_q \end{pmatrix} = \frac{V_0}{Z_e^2} \begin{pmatrix} -R_2 & X_1 \\ X_2 & R_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\delta_o) \\ \sin(\delta_o) \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

### 4.2.2 Couple de la machine

Le couple électrique peut être approximé par :

$$T_e \approx P_e = V_d i_d + V_q i_q \quad (4.12)$$

En substituant (4.6) dans (4.12) on a:

$$T_e = i_q e_q' + (x_q - x_d') i_d i_q \quad (4.13)$$

L'expression linéarisée du couple  $T_e$  s'obtient à partir de (4.13) et (4.10). Soit:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta e_q' \quad (4.14)$$

avec:

$$\begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ i_{q0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_d & F_q \\ Y_d & Y_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (x_q - x_d') i_{q0} \\ e_{q0}' + (x_q - x_d') i_{d0} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

### 4.2.3 Circuit d'excitation

L'équation linéarisée du circuit d'excitation s'écrit:

$$(1 + sT'_{d0}) \Delta e'_q = \Delta E_{fd} - (x'_d - x_d) \Delta i_d \quad (4.16)$$

En substituant (4.10) dans (4.16) on a:

$$(1 + sT'_{d0}K_3) \Delta e'_q = K_3 [\Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta] \quad (4.17)$$

avec:

$$\begin{aligned} K_3 &= 1 / [1 + (x'_d - x_d) Y_d] \\ K_4 &= (x'_d - x_d) F_d \end{aligned} \quad (4.18)$$

### 4.2.4 Tension de la machine

La variation de la tension  $V_t$  s'exprime dans les axes d et q comme (4.4):

$$\Delta V_t = \frac{V_{d0}}{V_{t0}} \Delta V_d + \frac{V_{q0}}{V_{t0}} \Delta V_q \quad (4.19)$$

En substituant (4.5) et (4.10) dans (4.19) on a:

$$\Delta V_{\tau} = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta e_q' \quad (4.20)$$

avec:

$$\begin{pmatrix} K_5 \\ K_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{V_{qo}}{V_{\tau o}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_d & F_q \\ Y_d & Y_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -x_d' \frac{V_{qo}}{V_o} \\ x_q \frac{V_{do}}{V_{\tau o}} \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

#### 4.2.5 Équation dynamique

L'équation dynamique avec un amortissement D s'écrit:

$$M s \Delta \omega + D \Delta \omega = -\Delta T_e \quad (4.22)$$

D'après (4.14) on a:

$$M s \Delta \omega + D \Delta \omega = - (K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta e_q') \quad (4.23)$$

avec:

$$s \Delta \delta = \omega_b \Delta \omega \quad (4.24)$$



L'équation de la tension  $e'_q$  est donnée par:

$$(1 + sT'_{do}) \Delta e'_q = K_3 (-K_4 \Delta \delta + \Delta E_{fd}) \quad (4.25)$$

La tension du régulateur est:

$$(1 + sT_a) \Delta E_{fd} = K_a (u_e - \Delta V_t) \quad (4.26)$$

Soit:

$$(1 + sT_a) \Delta E_{fd} = K_a (u_e - K_5 \Delta \delta - K_6 \Delta e'_q) \quad (4.27)$$

Les équations (4.17), (4.23), (4.24), et (4.27) peuvent s'écrire sous forme d'un système d'état:

$$\left[ \frac{dx}{dt} \right] = [A] [x] \quad (4.28)$$

avec:

$$x = (\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta e'_q, \Delta E_{fd})^T \quad (4.29)$$

et

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -k_1/m & -k_2/m & 0 \\ \omega_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_4/T_{do} & -1/T_{do}k_3 & 1/T_{do} \\ 0 & -k_a k_5/T_a & -k_a k_6/T_a & -1/T_a \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

Le système (4.28) peut être représenté par le diagramme bloc de la figure 4.4.

Dans le bloc régulateur (figure 4.4) les limites  $E_{max}$  et  $E_{min}$  sont choisies pour maintenir la tension de la machine dans l'intervalle de tolérance permise lors d'un défaut.

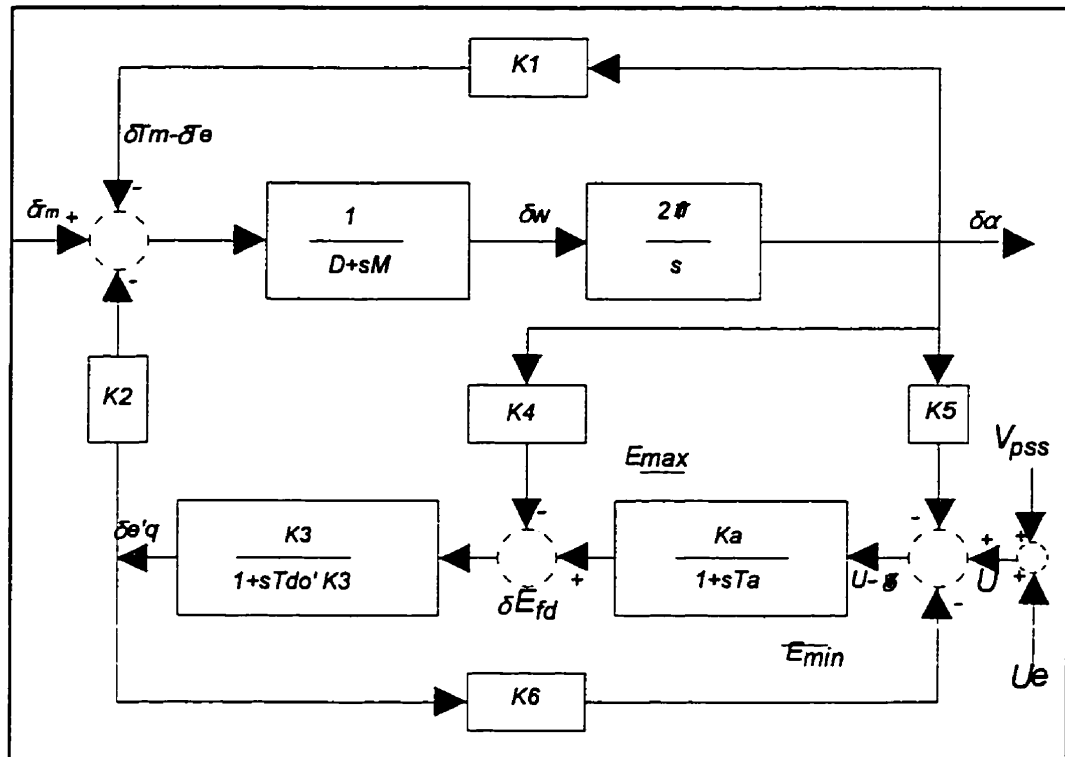


Figure 4.4: Modèle dynamique de la machine synchrone.

### 4.3 Stabilisateur

Dans le diagramme de la figure 4.4, la tension de commande  $U$  est appliquée à travers les blocs  $K_1$ ,  $K_3$  et  $K_2$  dont la fonction de transfert est:

$$G = \frac{K_a K_3 K_2}{(1+sT_a)(1+sT_{do}' K_3) + K_a K_3 K_6} \quad (4.31)$$

Le bloc stabilisateur  $G_c$  doit être conçu [Yu 1983] de manière à compenser la phase de  $G$  (3.33) à la fréquence propre, et avoir un gain correspondant au taux d'amortissement désiré (4.32). Soit:

$$K_c = \frac{2\zeta\omega_n M}{K_2 G_c G} \quad (4.32)$$

$$\angle G_c = \angle G \quad (4.33)$$

La figure 4.5 montre la forme d'un bloc stabilisateur avec le circuit de remise à zéro et les limites  $V_{max}$  et  $V_{min}$  de la tension  $V_{pss}$  du stabilisateur.

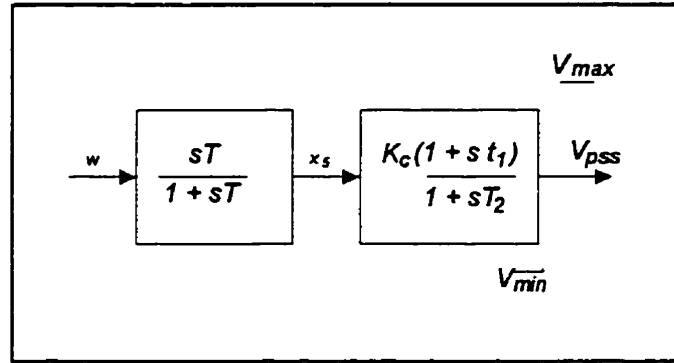


Figure 4.5: Stabilisateur

En ajoutant les équations d'état correspondant aux deux variables additionnelles  $x_s$  et  $V_{pss}$  du stabilisateur au système initial, nous obtenons la matrice d'état de la machine avec stabilisateur:

$$A_c = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} \omega & \delta & e'_q & E_{fd} & x_s & V_{pss} \end{array} \\ \left( \begin{array}{cccccc} . & . & . & . & 0 & 0 \\ . & [A] & . & . & 0 & 0 \\ . & . & . & . & 0 & 0 \\ . & . & . & . & 0 & K_a/T_a \end{array} \right) \\ \hline \begin{array}{cccccc} 0 & -k_1/m & -k_2/m & 0 & -1/T & 0 \\ 0 & -k_c k_1 t_1 / m T_2 & -k_c k_2 t_1 / m T_2 & 0 & k_c / T_2 (1 - t_1 / T) & -1 / T_2 \end{array} \end{array} \quad (4.34)$$

## 4.4 Performances dynamiques

Nous avons simulé le système pour les données et les conditions initiales du tableau 4.1 [Yu Y. 1983].

Tableau 4.1: Données et conditions initiales du système machine-réseau infini.

Machine synchrone	$M=9.26$ $T_{d0}=7.76$ $x_d=0.973$ $x'_d=0.190$ $x_q=0.550$
Excitation	$K_a=50$ $T_a=0.05$
Ligne	$R=0.34$ $X=0.997$ $G=0.249$ $B=0.262$
Conditions initiales	$P_{e0}=1.0$ $Q_{e0}=0.015$ $V_{t0}=1.05$

La matrice d'état (4.30) et les valeurs propres du système sont:

matrice d'état:

$$\begin{pmatrix} 0 & -0.0588 & -0.1303 & 0 \\ 377 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0900 & -0.1957 & 0.1289 \\ 0 & 95.5000 & -815.90 & -20.0000 \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

valeurs propres:

$$0.2950 + 4.9594i$$

$$0.2950 - 4.9594i \quad (3.36)$$

$$-10.3929 + 3.2830i$$

$$-10.3929 - 3.2830i$$

Le système présente des pôles ( $0.295 \pm j4.959$ ) non amortis. Un stabilisateur est donc requis pour amortir le système.

Les paramètres  $K_c$  et  $t$  du bloc stabilisateur (figure 4.5) calculés à partir des équations 4.32 et 4.33 pour un amortissement  $\xi = 0.3$  et les valeurs typiques  $T_2 = 0.1$ ,  $T = 3.0$ , nous obtenons:

$$\begin{aligned} K_c &= 7.09 \\ t_1 &= 0.6851 \end{aligned} \tag{4.37}$$

Les pôles du système avec stabilisateur sont:

$$\begin{aligned} &-18.7027 \\ &-4.6179 + 7.4826i \\ &-4.6179 - 7.4826i \\ &-1.1267 + 4.3331i \\ &-1.1267 - 4.3331i \\ &-0.3372 \end{aligned} \tag{4.38}$$

Les grandeurs dynamiques de la machine (avec et sans stabilisateur) pour un échelon de tension de -5% de la tension de référence  $U_e$  (figure 4.4) avec les limites  $V_{\max} = 0.1 \text{ pu}$ ,  $V_{\min} = -0.1 \text{ pu}$  sur le stabilisateur (figure 4.5) et  $E_{\max} = +1.25 \text{ pu}$ ,  $E_{\min} = -1.25 \text{ pu}$  sur l'excitation (figure 4. 4) sont montrées dans les figures suivantes.



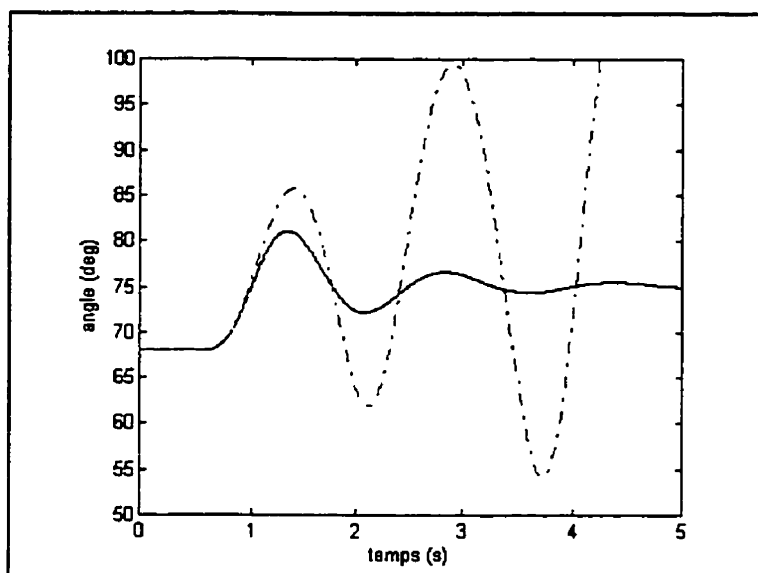


Figure 4.6: Angle de la machine pour une variation de 5% de la tension à  $t=0.5$ s.  
(-) avec stabilisateur.  
(-) sans stabilisateur.

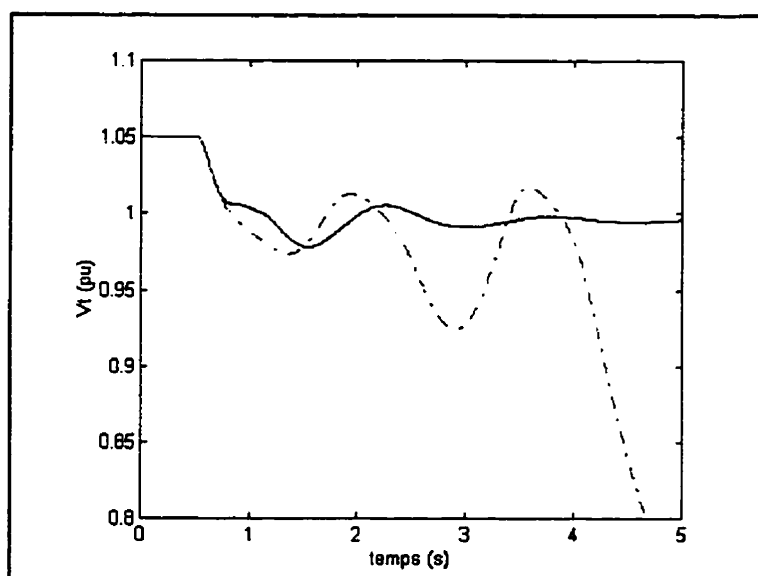


Figure 4.8: Tension de la machine pour une variation de 5% de la tension de référence.  
(-) avec stabilisateur.  
(-) sans stabilisateur.

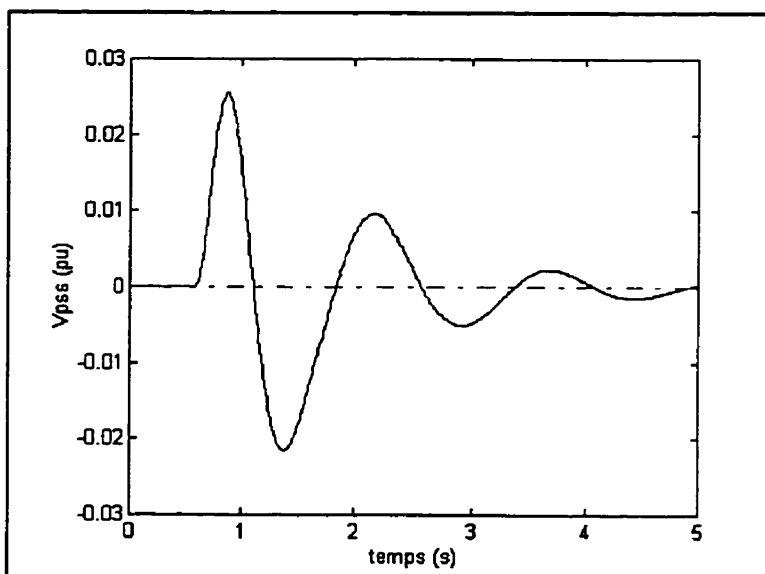


Figure 4.9: Tension de commande pour une variation de 5% de la tension à  $t=0.5$ s.  
 (-) avec stabilisateur.  
 (-.) sans stabilisateur.

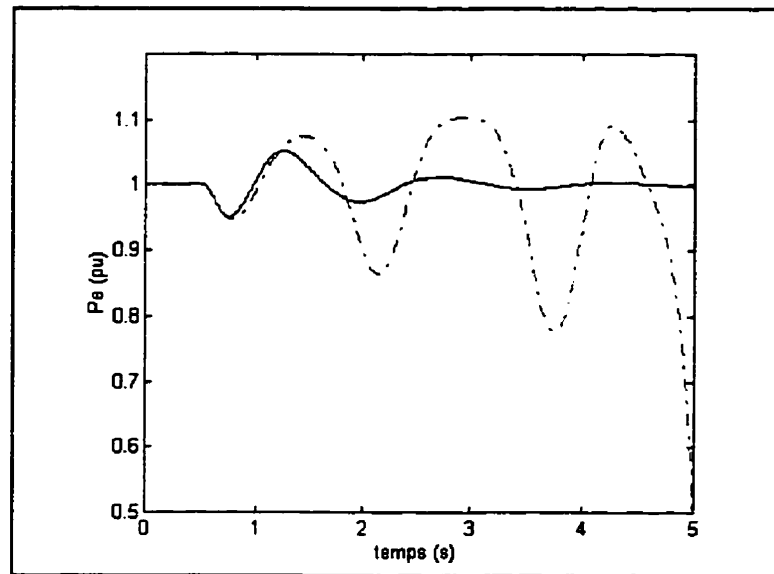


Figure 4.10: Puissance active de la machine pour une variation de 5% de la tension à  $t=0.5$ s.  
(-) avec stabilisateur.  
(-) sans stabilisateur.

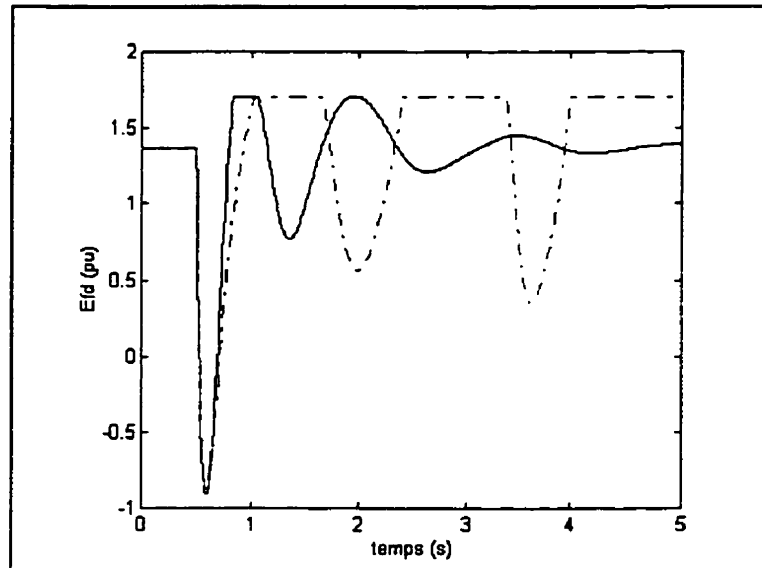


Figure 4.7: Excitation pour une variation de 5% de la tension à  $t=0.5$ s.  
(-) avec stabilisateur.  
(-) sans stabilisateur.

## 4.5 Analyse des performances du stabilisateur

Dans ce paragraphe nous utilisons la procédure de Taguchi pour analyser les performances du régulateur calculé précédemment (4.37).

**4.5.1 Analyse de sensibilité.** L'impact des variations des paramètres du stabilisateur sur les performances du réglage est déterminé généralement par l'analyse de sensibilité. La méthode classique d'analyse de sensibilité est limitée. Elle ne permet pas d'estimer les effets d'interaction entre les paramètres du régulateur. Pour mettre cela en évidence, nous analysons l'influence des variations des paramètres du régulateur sur les performances du réglage par les deux méthodes:

-l'analyse de sensibilité classique qui consiste à varier un paramètre à la fois.

-la méthode des tableaux orthogonaux utilisée par Taguchi où plusieurs facteurs varient simultanément.

Supposons une variation de  $\pm 25\%$  des valeurs des paramètres  $K_c$  et  $t_l$  calculés précédemment (4.35). Cela nous donne les valeurs suivantes:

$$\begin{aligned} K_- &= 5.3175 & t_- &= 0.5138 \\ K_+ &= 8.8625 & t_+ &= 0.8564 \end{aligned} \quad (4.39)$$

La sensibilité de l'angle de la machine aux variations individuelles de  $K_c$  et  $t_l$  lors d'une perturbation de 5% de la tension à l'instant  $t=1s$  est montrée aux figures 4.11 et 4.12.

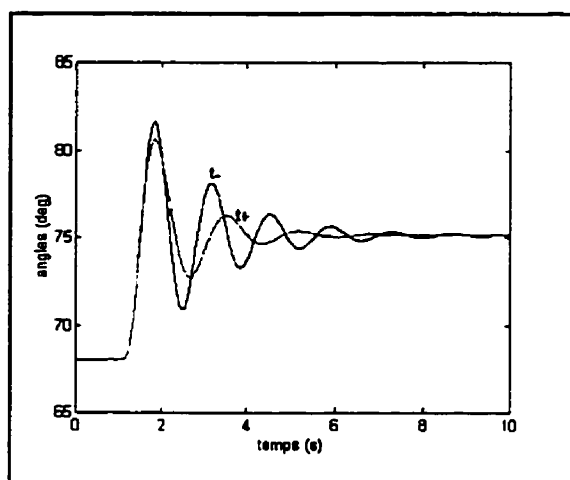


Figure 4.11: Effet des variations de  $t_l$  sur l'angle  $\delta$ .

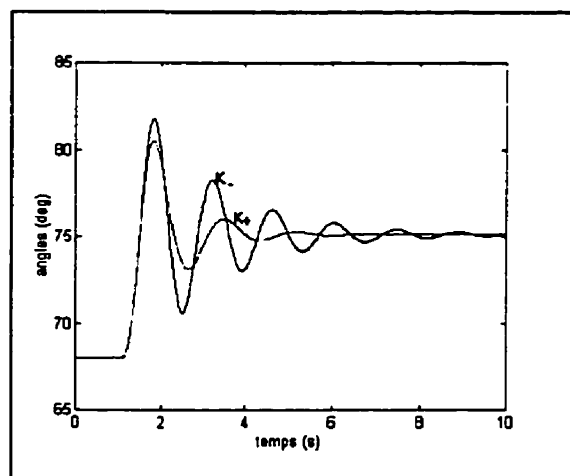


Figure 4.12: Effet des variations de  $K_c$  sur l'angle  $\delta$ .

D'après les figures 4.11 et 4.12 on constate que la variation de  $\pm 25\%$  des paramètres  $K_c$  et  $t_1$  affecte légèrement les performances dynamiques de l'angle de la machine. Le système reste stable et les oscillations de l'angle sont atténuées après quelques secondes.

Si on analyse l'impact des variations de  $\pm 25\%$  des paramètres  $K_c$  et  $t_1$  par la méthode des tableaux orthogonaux, nous considérons le tableau 4.2 où les éléments  $(-1, +1)$  correspondent aux niveaux  $(K_-, K_+)$  de  $K_c$  et  $(t_-, t_+)$  de  $t_1$  et nous simulons l'angle de la machine pour la perturbation supposée.

Tableau 4.2: Tableau orthogonal  $OA_4(2^2)$

Essais	Paramètres	
	$K_c$	$t_1$
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1

Les courbes 1, 2, 3 et 4 de la figure 4.13 correspondent à l'angle de la machine pour les 4 combinaisons du tableau 4.2 lors d'une perturbation de 5% de la tension à  $t=1s$ .



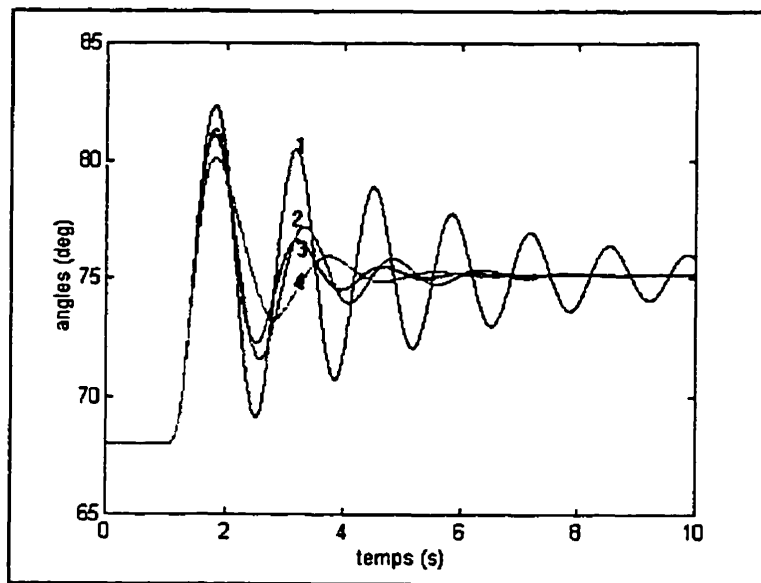


Figure 4.13: Effet des variations simultanées de  $t_1$  et  $K_c$  sur l'angle  $\delta$ .

Nous constatons (figure 4.13) que les performances se détériorent pour le cas 1 ( $K_c = K_{c_0}$  et  $t_1 = t_{1_0}$ ) où les oscillations persistent au delà de 10 secondes.

Pour pouvoir comparer les résultats obtenus par la méthode des tableaux orthogonaux (figures 4.13) avec ceux de l'analyse classique de sensibilité nous superposons les effets individuels de  $K_c$  et de  $t_1$  obtenus dans les figures 4.11 et 4.12. Ainsi nous avons les courbes de la figure 4.14.

Les courbes 1, 2, 3 et 4 de la figure 4.14 correspondent aux valeurs  $(K_{c_0}, t_{1_0})$ ,  $(K_{c_+}, t_{1_0})$ ,  $(K_{c_0}, t_{1_+})$  et  $(K_{c_+}, t_{1_+})$  obtenues par superposition.

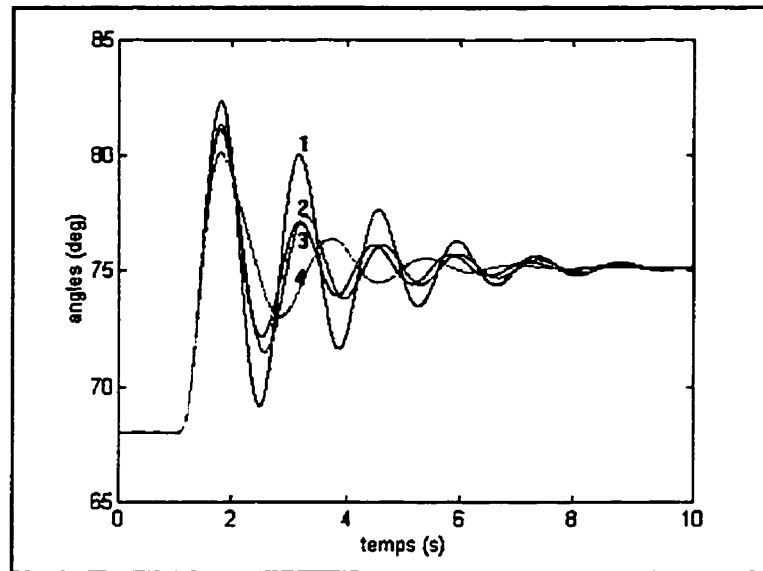


Figure 4.14: Effet résultant de la superposition des effets individuels de  $t_1$  et  $K_c$  sur l'angle  $\delta$ .

Nous constatons que les résultats (figures 4.13 et 4.14) obtenus par les deux méthodes diffèrent et ce à cause des interactions entre les paramètres  $K_c$  et  $t_1$ . Nous estimons ces interactions dans ce qui suit.

## 4.6 Effet des interactions

Soit  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$  la réponse d'un système. La variance totale  $V_T$  de  $y$  pour une variation des  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) peut être partitionnée en une somme de  $2^n - 1$  termes:

$$V_T = V_1 + \dots + V_n + V_{1,2} + \dots + V_{n-1,n} + \dots + V_{1,2,\dots} \quad (4.40)$$

où  $V_i$  représente la variance due à la variable  $x_i$ , appelée effet principal de  $x_i$ , et  $V_{i,\dots,j}$  les effets d'interactions entre  $x_i, \dots, x_j$ .

La méthode analytique évalue uniquement les termes principaux  $V_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) à partir de la dérivée de  $y$ . Soit:

$$(\Delta Y)_i = \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \right) \quad (4.41)$$

Les termes  $V_{i,\dots,j}$  d'interaction ne sont pas estimés par l'approche analytique. D'où l'intérêt d'utiliser les tableaux orthogonaux.

Pour le régulateur étudié au paragraphe précédent, les interactions entre  $K_c$  et  $t_l$  correspondent à la différence entre les courbes des figures 4.13 et 4.14. Nous constatons (figure 4.15) que pour le cas 1 ( $K_c=K_c$ ,  $t_l=t_l$ ) les interactions sont importantes.

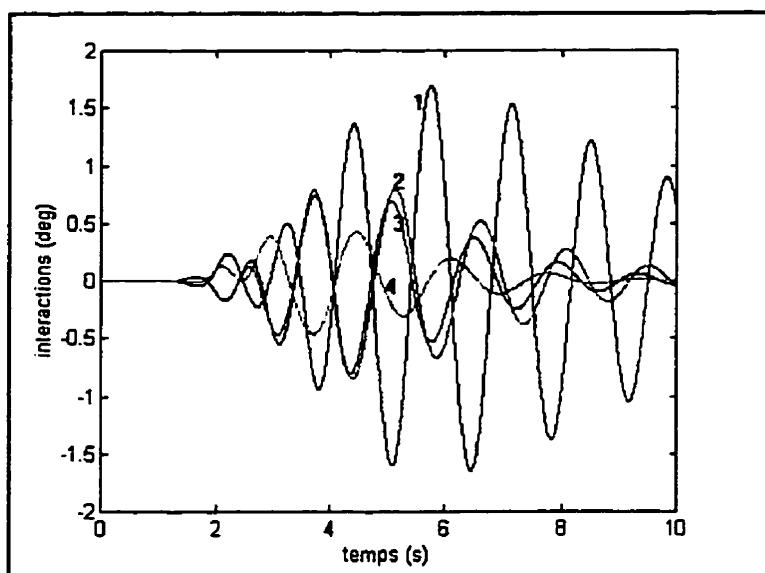


Figure 4.15: Les interactions entre  $K_c$  et  $t_1$  pour les 4 positions du tableau 4.2.

## 4.7 Ajustements des paramètres

Dans ce paragraphe nous montrons comment on peut exploiter les résultats d'analyse de sensibilité par les tableaux orthogonaux pour ajuster les paramètres du stabilisateur afin d'améliorer les performances du réglage. Pour cela nous remarquons dans le tableau 4.2 que nous avons deux essais pour chaque position de  $K_c$  et  $t_1$ :

essais 1, 3 pour  $K_c = K_*$

essais 2, 4 pour  $K_c = K_*$

essais 1, 2 pour  $t_1 = t_*$

essais 3, 4 pour  $t_1 = t_*$

Si nous analysons les courbes de la figure 4.13 deux à deux comme suit:



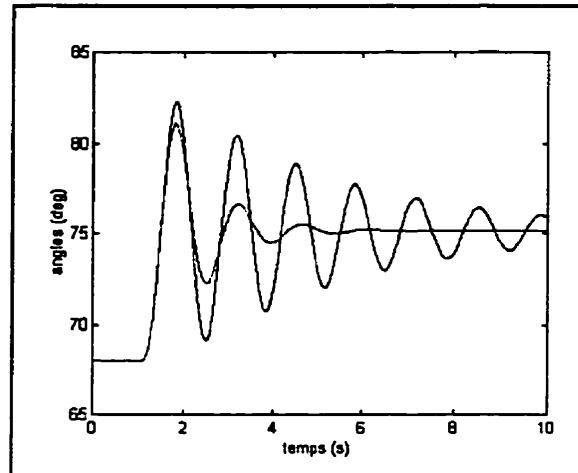


Figure 4.18: Effet des variations de  $K_c$  pour  $t_1 = t_+$ .

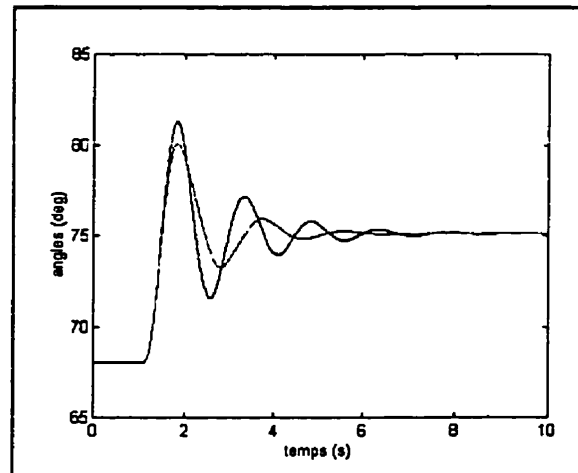


Figure 4.19: Effet des variations de  $K_c$  pour  $t_1 = t_+$ .

Nous constatons dans la figure 4.17 que pour  $K_c=K_*$ , l'angle est moins sensible aux variations de  $t_1$  et dans la figure 4.19 pour  $t_1 = t_*$ , l'angle est moins sensible aux variations de  $K_c$ . L'intérêt de ce résultat c'est que:

1- Si pour une certaine raison pratique (coordination entre régulateurs par exemple) nous voulons ajuster le gain  $K_c$  cette méthode des tableaux orthogonaux nous donne le niveau de  $t_1$  (ici  $t_1=t_*$ ) qui permet cet ajustement de  $K_c$  sans dégrader les performances du réglage.

2- Si un des paramètres  $K_c$  ou  $t_1$  est soumis au bruit, l'influence de ce bruit peut être réduite par le choix du niveau de l'autre paramètre.

Ces informations qualitatives utiles en pratique ne sont pas fournies par les algorithmes de conception des régulateurs.

Suite à cette analyse nous pouvons conclure que:

-une réduction simultanée des paramètres  $K_c$  et  $t_1$  dégradent la performance du régulateur.

-les interactions sont importantes pour les positions  $K_*$  et  $t_*$  des paramètres.

-l'ajustement de  $K_c$  à  $K_*$  améliore la robustesse du régulateur aux variations de la tension et du paramètre  $t_1$ .

-l'ajustement de  $t_1$  à  $t_*$  améliore la robustesse du régulateur aux variations de la tension et du paramètre  $K_c$ .

Comme la robustesse de la solution dépend de la nature et de l'amplitude de la perturbation, nous avons simulé les performances dynamiques de l'angle de la machine pour un défaut triphasé avec ouverture de phase. Les résultats obtenus pour les 4 solutions du tableau 4.2 sont présentés dans la figure 4.20.

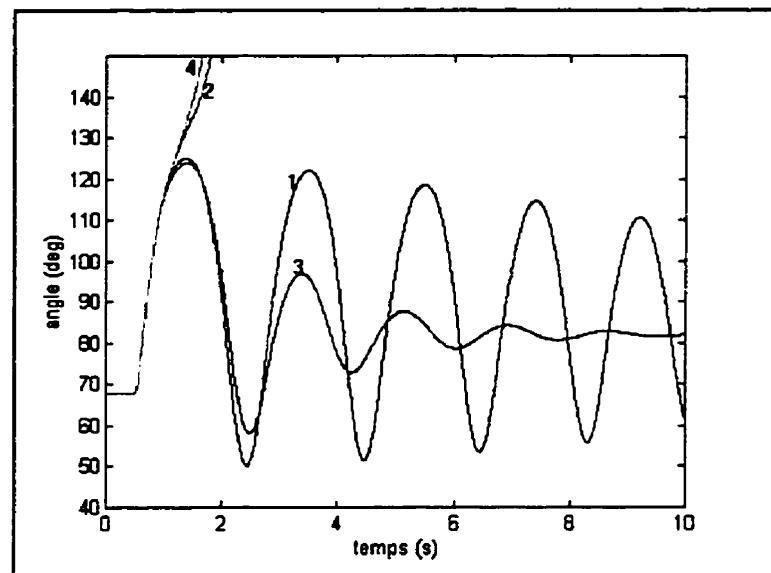


Figure 4.20: angle  $\delta$  pour un défaut triphasé à  $t=0.5s$  et une ouverture de phases après 3 cycles.

Nous constatons dans la figure 4.20 que la solution 3 garantit (en plus de la robustesse aux variations de tensions) la stabilité de la machine. La solution 3 correspond à  $K_c=8.86$  et  $t_1=0.5138$ .



Pour pouvoir comparer la solution 3 obtenue par cette procédure avec la solution initiale ( $K_c=7.09$ ,  $t_l=0.6851$ ) nous avons simulé l'angle de la machine pour la même perturbation (défaut triphasé+ ouverture de phases).

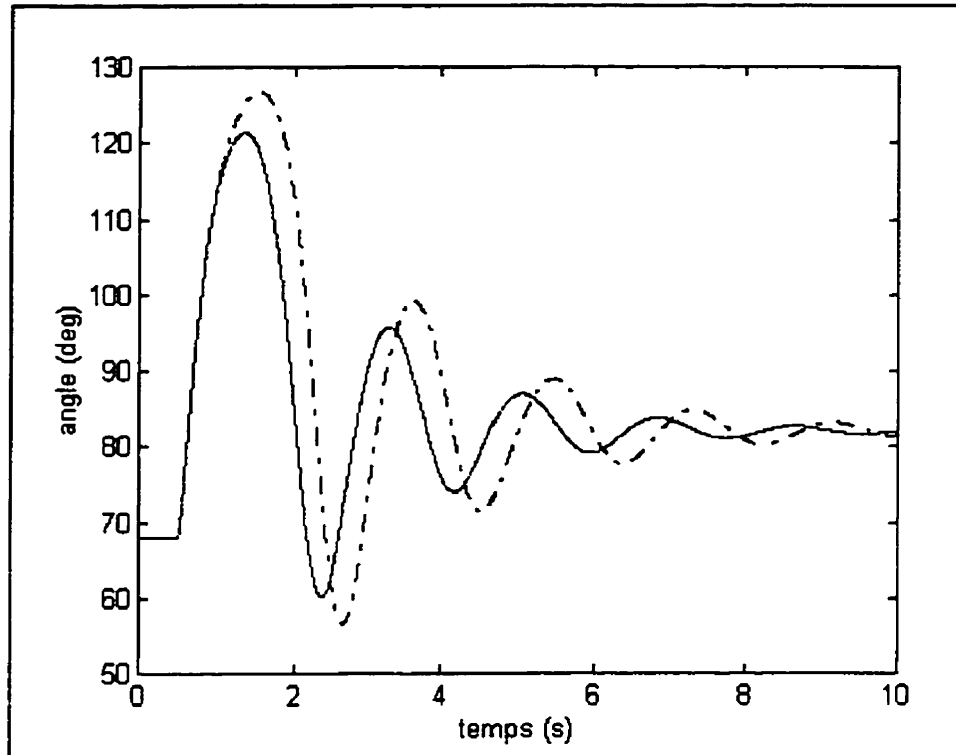


Figure 4.21: angle  $\delta$  pour un défaut triphasé à  $t=0.5s$  et une ouverture de phases après 3 cycles.

(-):  $K_c=8.86$ ,  $t_l=0.5138$  (---):  $K_c=7.09$ ,  $t_l=0.6851$

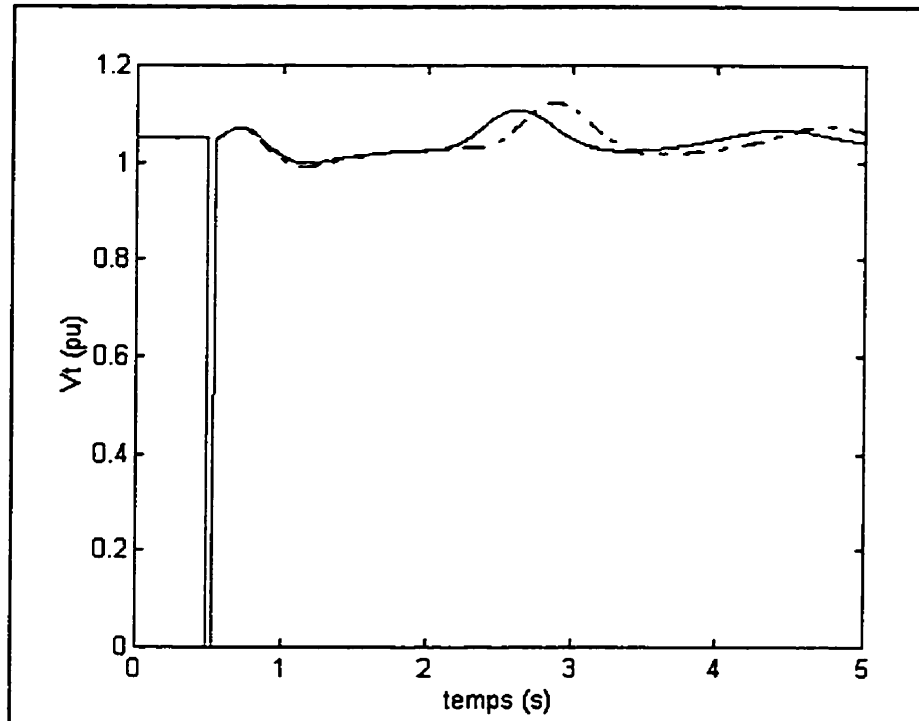


Figure 4.22: Tension pour un défaut triphasé à  $t=0.5$ s et une ouverture de phases après 3 cycles.

(-):  $K_c=8.86, t_1=0.5138$  (---):  $K_c=7.09, t_1=0.6851$

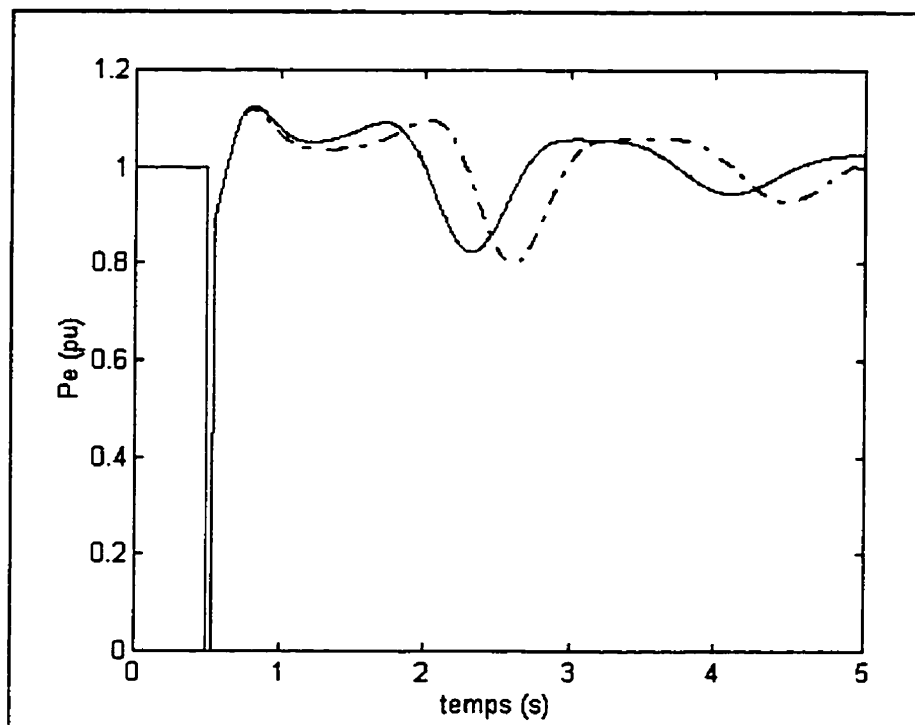


Figure 4.23: Puissance pour un défaut triphasé à  $t=0.5s$  et une ouverture de phases apres 3 cycles.

(-):  $K_c=8.86$ ,  $t_i=0.5138$  (--) :  $K_c=7.09$ ,  $t_i=0.6851$

## 4.8 Variations des paramètres

Dans ce paragraphe nous analysons la sensibilité de la solution précédente aux variations statistiques des paramètres du système et nous déterminons l'ajustement des facteurs de contrôles  $K_c$  et  $t_1$  qui optimise les performances d'une grandeur caractéristique du régulateur.

### 4.8.1 Spécification des performances

La grandeur essentielle qui caractérise un régulateur est le temps de réponse. Sans stabilisateur, la réponse du système est dominée par les pôles instables. Le stabilisateur a été conçu pour donner à la réponse du système l'allure d'un deuxième ordre avec un amortissement  $\xi$  à la fréquence propre  $\omega_n$ . Le temps de réponse correspondant est:

$$\tau \approx 3/\xi\omega_n \quad (4.42)$$

Nous spécifions pour la grandeur  $\tau$  la performance caractéristique le plus petit le meilleur.

Le rapport signal bruit correspondant à cette performance est défini dans l'équation 2.13. Soit:

$$\eta_i = -10 \log(\sum_j \tau_{ij}^2) \quad (4.43)$$

avec  $\tau_{ij}$  le temps de réponse correspondant à la position  $X_i$  des facteurs de contrôle  $X$  sous le bruit  $\Omega_j$  de l'espace bruit  $\Omega$ .

Nous choisissons pour les contrôles  $K_c$  et  $t_1$  le tableau orthogonal 4.3 où les éléments -1, 0 et 1 correspondent à une variation de -10% , 0% et +10% de la solution initiale.

Tableau 4.3:Tableau orthogonal  $OA_9(3^2)$ .

Cas	$k_c$	$t_1$
1	0	0
2	0	-1
3	0	1
4	-1	0
5	-1	-1
6	-1	1
7	1	0
8	1	-1
9	1	1

Pour les facteurs bruit  $\Omega$ , nous choisissons les paramètres  $v_0$ ,  $x_d$ ,  $x_q$ ,  $r$ ,  $x$  et  $v_t$  que nous affectons aux colonnes 1, 2, 3, 4, 5 et 6 du tableau 4.4 (la colonne 7 du tableau 4.4 n'est pas utilisée).

Les éléments -1 et 1 du tableau 4.4 représentent les niveaux des paramètres obtenus en supposant une variation de  $\pm 5\%$  des valeurs initiales (tableau 4.1) .

Tableau 4.4:  $OA_8(2^7)$

Cas	$v_0$	$x_d$	$x_q$	$r$	$x$	$v_t$	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	1	1	1	1
3	-1	1	1	1	1	-1	-1
4	-1	1	1	-1	-1	1	1
5	1	1	-1	-1	1	1	-1
6	1	1	-1	1	-1	-1	1
7	1	-1	1	1	-1	1	-1
8	1	-1	1	-1	1	-1	1

L'évaluation du rapport signal/bruit pour les différentes valeurs de  $k_c$  et  $t_1$  (tableau 4.3) sous le bruit  $\Omega$  (tableau 4.4) nous donne le résultat suivant:

Tableau 4.5 : Rapport signal/bruit pour les différents réglages du stabilisateur.

Cas	Paramètres		Rapport s/b
	Kc	$t_i$	
1	7.0900	0.6851	-9.8136
2	6.0265	0.6851	-10.7904
3	8.1535	0.6851	-9.5458
4	7.0900	0.5823	-10.2960
5	7.0900	0.7879	-9.7176
6	6.0265	0.5823	-11.9133
7	6.0265	0.7879	-10.2512
8	8.1535	0.5823	-9.6293
9	8.1535	0.7879	-9.5501

Dans le tableau 4.5 , nous constatons que le rapport s/b est maximal pour la solution #3 et il est minimal pour la solution 6. Cela veut dire qu'un ajustement des facteurs de contrôle Kc et  $t_i$  aux valeurs 8.1535 et 0.6851 améliore la robustesse de la solution aux variations statistiques des paramètres supposés. Par contre les valeurs Kc= 6.0265 et  $t_i$ = 0.5823 (cas #6) rendent le régulateur plus sensible aux variations des paramètres.

Pour valider ce résultat nous avons fait une simulation non linéaire du comportement dynamique de la machine pour les deux solutions (#6 et #3) lors d'un défaut triphasé et une ouverture de phase.

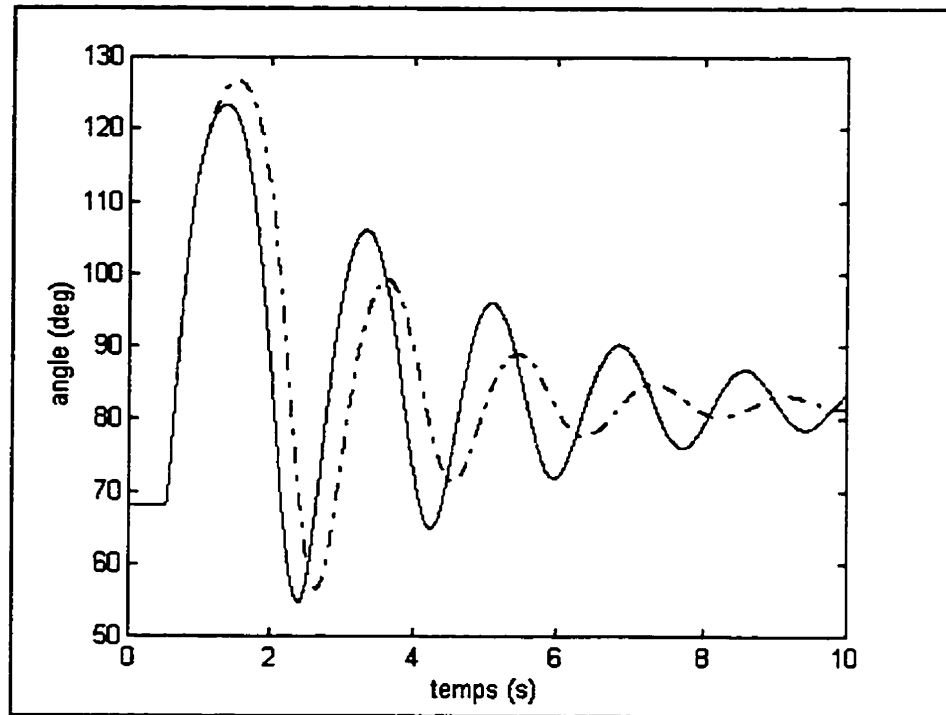


Figure 4.24: Angle  $\delta$  pour un défaut triphasé à  $t=0.5s$  et une ouverture de phases après 3 cycles.

(--):  $K_c=8.153$ ,  $t_1=0.685$     (-):  $K_c=6.026$ ,  $t_1=0.582$

Nous constatons dans la figure 4.24 que pour la solution 3 l'angle se stabilise dans sa nouvelle position d'équilibre plus rapidement que dans le cas 6.

La même constatation est faite si on analyse les positions des pôles (tableau 4.6) des deux solutions obtenus en effectuant une simulation linéaire.



Tableau 4.6: Pôles du système pour les deux solutions.

Solution #3 (rapport s/b maximal)	Solution #6 (rapport s/b minimal)
-19.3588	-18.0171
-4.2138 + 8.2372i	-5.1438 + 6.7417i
-4.2138 - 8.2372i	-5.1438 - 6.7417i
-1.2026 + 4.0047i	-0.9438 + 4.6379i
-1.2026 - 4.0047i	-0.9438 - 4.6379i
-0.3374	-0.3369

Dans le tableau 4.6 les pôles de fréquence  $\omega_n$  ( 4 rd/s) sont plus éloignés de l'axe imaginaire dans le cas # 3 que dans le cas #6.

Si nous répétons la procédure pour améliorer d'avantage la performance de la solution 3 nous obtenons les valeurs suivantes de  $K_c$  et  $t_1$ :

$$K_c = 9.2170 \text{ et } t_1 = 0.4796$$

Les pôles du système pour ces nouvelles positions de  $K_c$  et  $t_1$  sont:

$$\begin{array}{lll} -18.2864 & -4.7087 + 6.8503i & -1.2432 + 4.6143i \\ -0.3388 & -4.7087 - 6.8503i & -1.2432 - 4.6143i \end{array}$$

Si on compare le comportement dynamique de la solution améliorée ci-dessus ( $K_c=9.2170$  et  $t_l=0.4796$ ) avec la solution initiale ( $K_c=7.0900$  et  $t_l=0.6851$ ) lors d'un défaut triphasé avec ouverture de phases, nous constatons (figures ci-dessous) que la solution améliorée est moins sensible à la perturbation supposée.

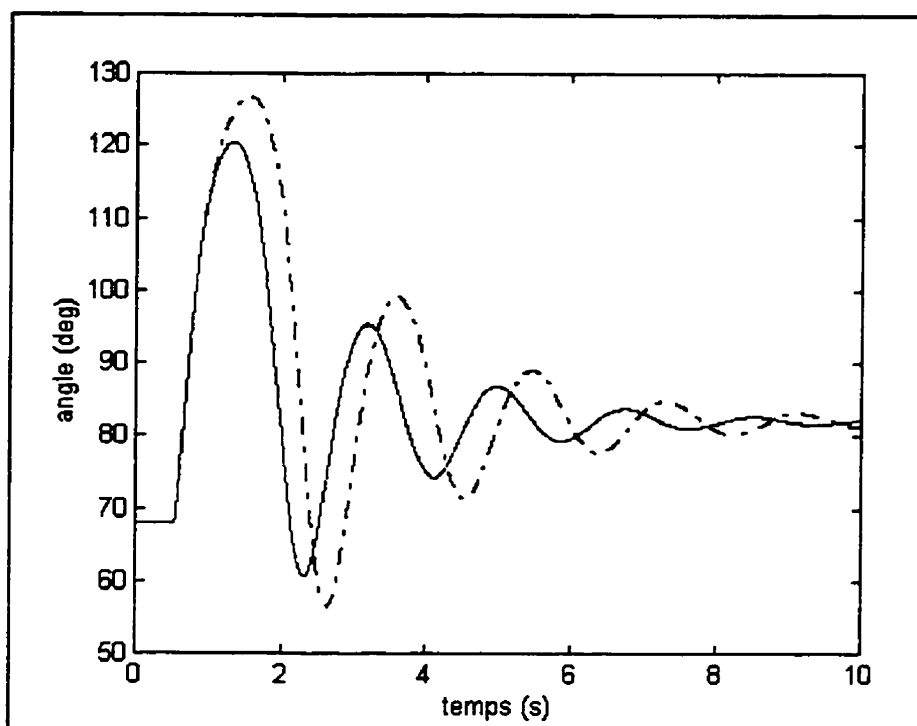


Figure 4.25: Angle pour un défaut triphasé à  $t=0.5s$  et une ouverture de phases après 3 cycles.

(-): solution initiale    (---): solution améliorée

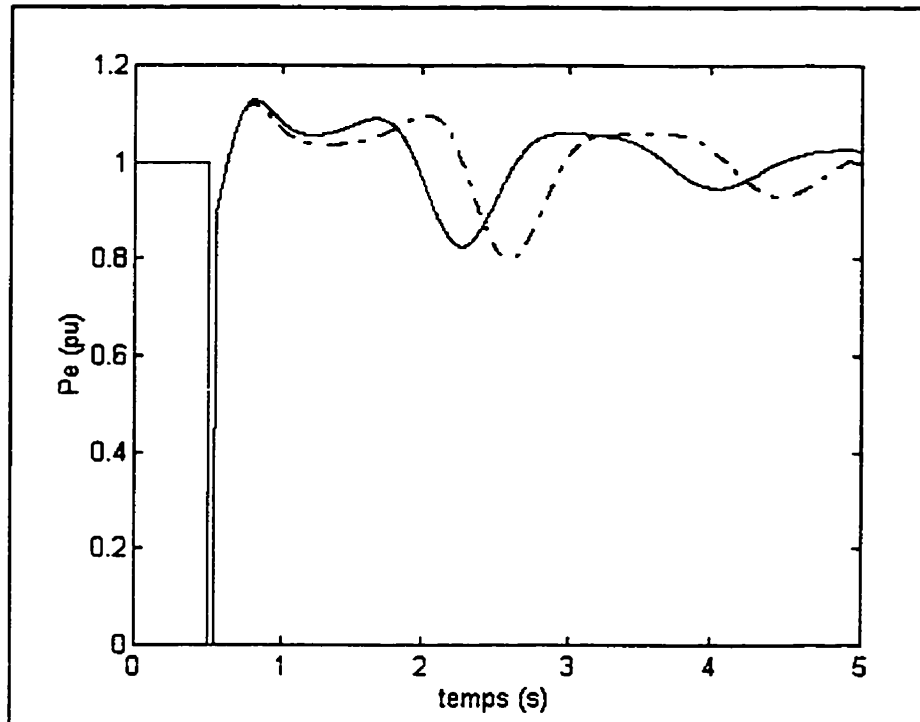


Figure 4.26: Puissance pour un défaut triphasé à  $t=0.5$ s et une ouverture de phases après 3 cycles.  
(-): solution initiale    (---): solution améliorée

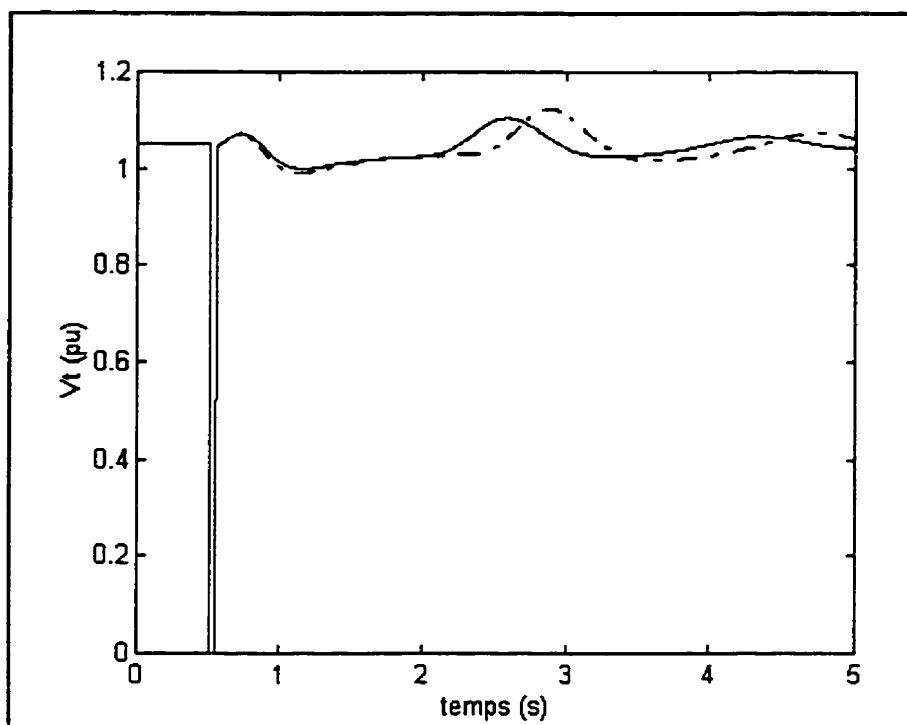


Figure 4.27: Tension pour un défaut triphasé à  $t=0.5$ s et une ouverture de phases après 3 cycles.

(-): solution initiale    (---): solution améliorée

## 4.9 Réseau multimachines

Dans ce paragraphe nous analysons la performance du réglage dans un réseau multimachines. Pour cela nous considérons le réseau de trois machines de la figure 4.28 dont les données sont présentées dans l'annexe C. Le modèle dynamique sans stabilisateurs de ce réseau présenté dans les références[Fleming R. J., Mohan M. A., Parvatisam K. 1981], [Lefebvre S. 1983], [Abdalla O. H., Hassan S. A., Tweig N. T. 1984] a la matrice d'état A suivante:

matrice d'état

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.47 & -.039 & -.013 & 0 & .022 & .004 & 0 & 0 & .046 & .02 & .003 & 0 \\ -.266 & -3.39 & -.922 & 1 & -.0087 & .754 & .024 & 0 & -.25 & 1.13 & .072 & 0 \\ -30.1 & -309.1 & -60.94 & -20 & 24.6 & -92 & -3.50 & 0 & 62.05 & -1675 & 10.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ .004 & -.034 & -.00645 & 0 & -.149 & .032 & -.008 & 0 & .079 & -.028 & 0 & 0 \\ .121 & 1.131 & .021 & 0 & -1.6 & -1.885 & -.21 & 1 & .46 & .754 & .06 & 0 \\ -18.5 & -64.5 & -12.55 & 0 & 106.1 & -516.11 & -21.6 & -20 & 17 & -172 & -11.41 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 \\ 0 & -.017 & -.003 & 0 & .017 & -.01 & 0 & 0 & -.056 & -.017 & -.009 & 0 \\ .083 & 0 & -.002 & 0 & .22 & 0 & .011 & 0 & -1.2 & -1.131 & -.197 & 1 \\ -10.1 & -33.93 & -6.78 & 0 & 1.7 & -46.37 & -2.1 & 0 & 70.1 & -893.5 & -54.4 & -20 \end{pmatrix}$$

Les valeurs propres de ce système sont:

$$\begin{array}{ccccc} -18.8713 & -17.0519 & -15.1893 & 0.0953 + 7.8364i & 0.0953 - 7.8364i \\ -5.8914 & -3.4305 & -1.5112 & -0.0627 + 7.3692i & -0.0627 - 7.3692i \\ & & & 0.2637 + 4.0915i & 0.2637 - 4.0915i \end{array}$$

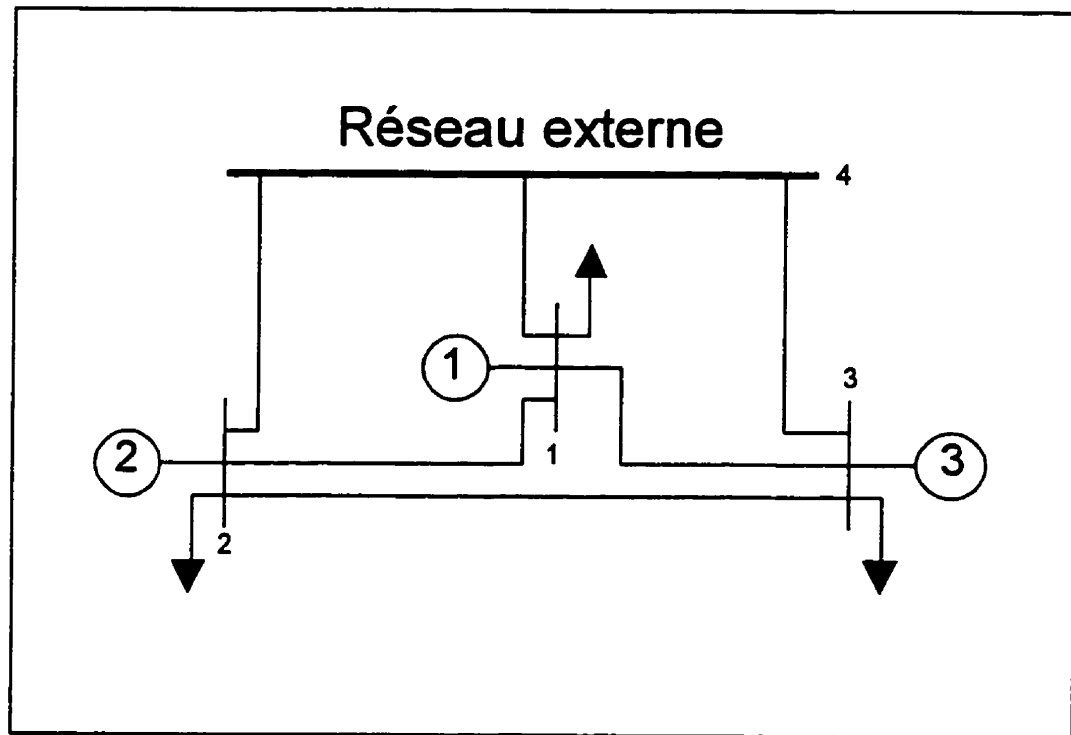


Figure 4.28: Réseau 3-machines.

Le système présente des pôles non amortis. Il est instable. Les vitesses des machines pour une perturbation de 1% de tension de la machine #1 ont l'allure de la figure 4.29.

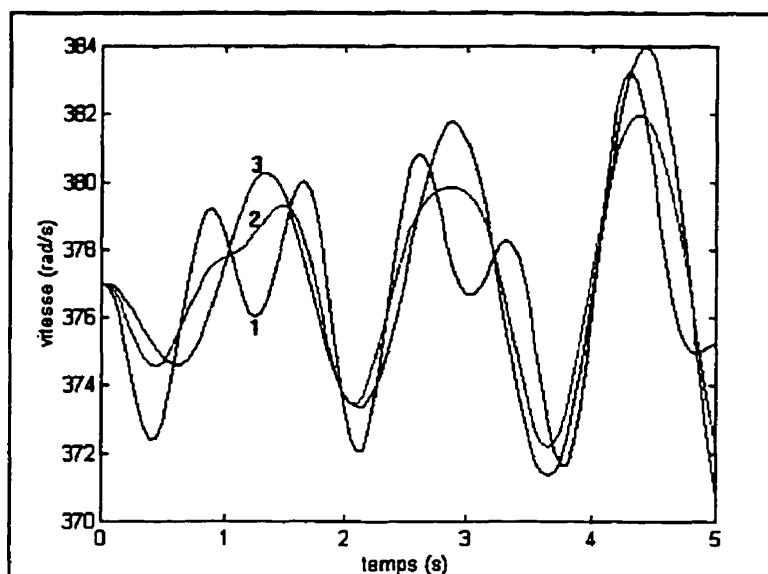


Figure 4.29: Vitesse des machines 1,2 et 3 sans stabilisateurs pour une turbation de 1% de la tension de la machine #1.

Pour stabiliser le système on équipe les machines des stabilisateurs. Les paramètres des trois stabilisateurs calculés par Lefebvre[Lefebvre 1983] pour les différents cas d'amortissements sont présentés dans le tableau 4.7

La vitesse des machines pour les 4 configurations d'amortissement (tableau 4.7) lors d'une perturbation de 1% de la tension de la machine #1 a l'allure des figures 4.30, 4.31 et 4.32.

Tableau 4.7: Paramètres des stabilisateurs pour 4 réglages [Lefebvre 1983].

Machine	Paramètres des stabilisateurs	<u>Amortissement</u>			
		0.5	0.5	0.3	0.4
1	$ks_1$	31.1510	31.6400	34.2750	14.9740
	$a_1$	0.0309	0.0291	0.0275	0.1142
	$b_1$	0.3019	0.3359	0.3399	0.5790
2	$ks_2$	41.9220	37.8470	39.3600	2.4940
	$a_2$	0.0668	0.0869	0.0851	0.7079
	$b_2$	0.3498	0.6436	0.8003	6.8720
3	$ks_3$	11.6000	15.3210	15.4120	41.3070
	$a_3$	0.0255	0.0222	0.0244	0.0218
	$b_3$	0.4948	0.3708	0.3745	0.3123

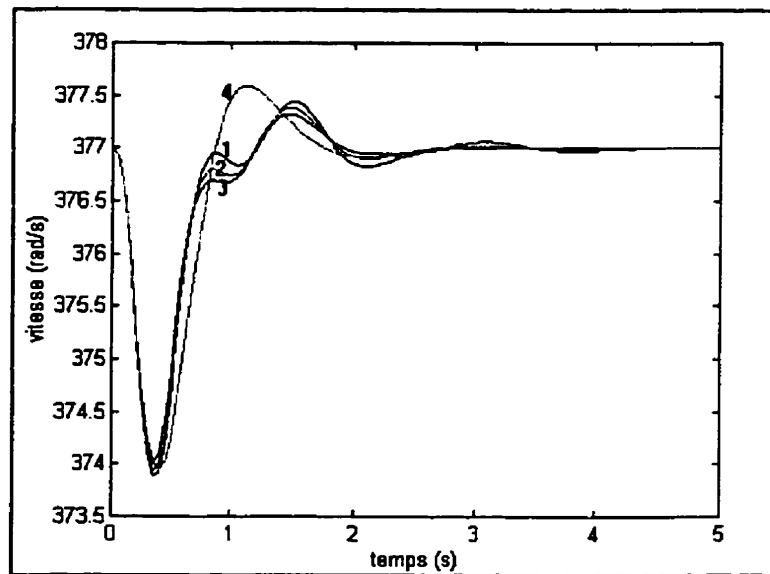


Figure 4.30: Vitesse de la machine 1 pour les 4 réglages lors d'une perturbation de 1% de la tension de la machine 1.



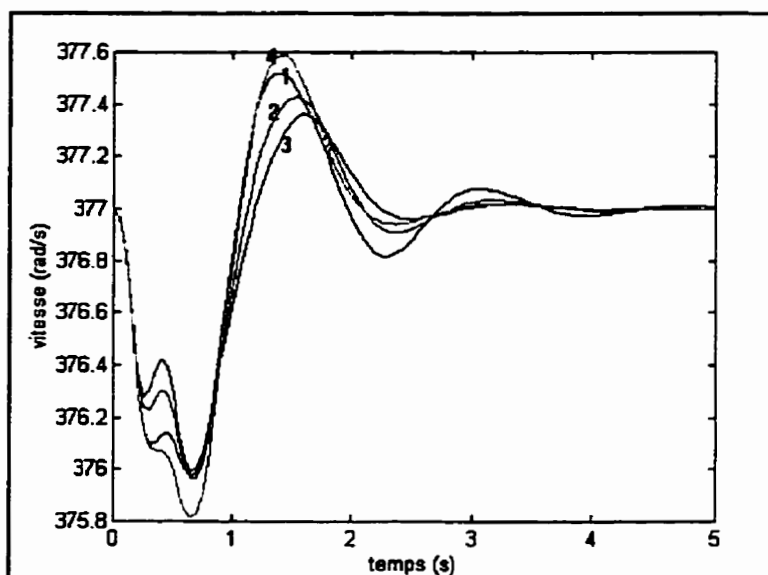


Figure 4.31: Vitesse de la machine 2 pour les 4 réglages lors d'une perturbation de 1% de la tension de la machine 1.

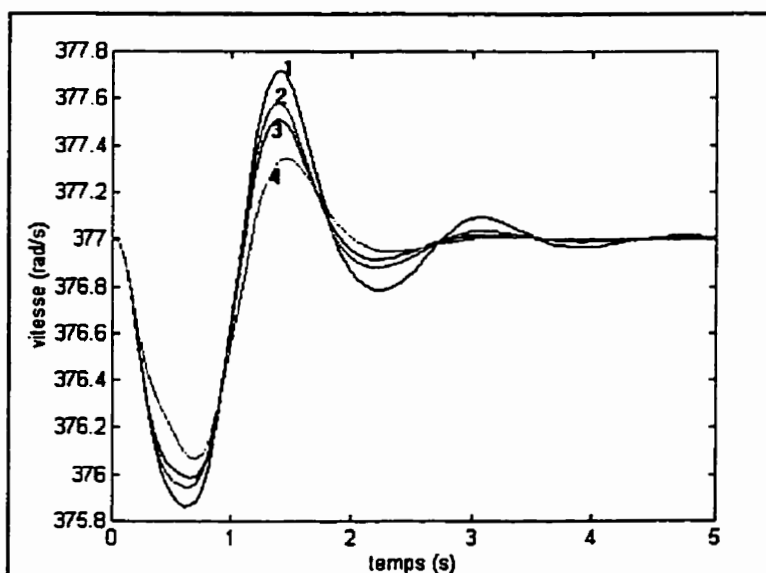


Figure 4.32: Vitesse de la machine 3 pour les 4 réglages lors d'une perturbation de 1% de la tension de la machine 1.

### 4.9.1 Analyse des performances des stabilisateurs

Nous analysons les performances des 4 solutions du tableau 4.7 aux variations de paramètres du système avec la procédure proposée pour déterminer laquelle des 4 solutions est la plus performante. Pour cela nous spécifions la performance recherchée et nous déterminons la solution qui optimise le choix spécifié.

Supposons que nous nous intéressons à la position des valeurs propres du système. La désirabilité choisie pour la partie réelle des pôles est la courbe de la figure 4.33 où  $a_i$  représente la partie réelle du pôle le moins amorti (plus proche de l'axe imaginaire).

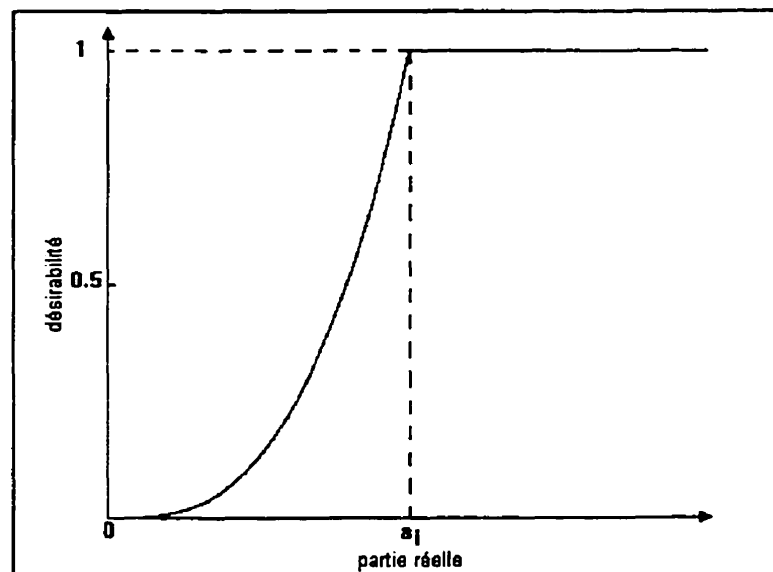


Figure 4.33: Désirabilité de la position des pôles.

Les valeurs de  $a_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) correspondantes aux 4 réglages du tableau 4.7 sont obtenues en calculant les valeurs propres pour les 4 cas d'amortissements. Soient:

Tableau 4.8: Parties réelles des pôles les moins amortis pour les 4 solutions du tableau 4.7.

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
-1.16	-1.41	-1.53	-1.83

D'après les spécifications précédentes, la solution performante est celle qui présente une désirabilité maximale lors des variations statistique des paramètres.

Les facteurs bruit peuvent être les paramètres imprécis ou soumis à des variations incontrôlables. Dans cette analyse nous prenons les coefficients  $A_{(2,1)}$ ,  $A_{(2,3)}$ ,  $A_{(6,5)}$ ,  $A_{(6,7)}$ ,  $A_{(10,9)}$ ,  $A_{(10,11)}$  de la matrice d'état et nous supposons une variation de 30% suivant le tableau orthogonal 4.9. (la colonne 7 du tableau 4.9 marquée par '\*' n'est pas utilisée).

Tableau 4.9: Tableau orthogonal  $OA_8(2^7)$ .

Essai	Paramètres						
	$A_{(2,1)}$	$A_{(2,3)}$	$A_{(6,5)}$	$A_{(6,7)}$	$A_{(10,9)}$	$A_{(10,11)}$	*
1	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	+	+	+	+
3	-	+	+	+	+	-	-
4	-	+	+	-	-	+	+
5	+	+	-	-	+	+	-
6	+	+	-	+	-	-	+
7	+	-	+	+	-	+	-
8	+	-	+	-	+	-	+

La désirabilité obtenue pour chacune des solutions est présenté au tableau 4.10.

Tableau 4.10: Désirabilité des 4 solutions.

Solution	1	2	3	4
Désirabilité	0.4306	0.3507	0.3991	0.2092

Nous constatons (tableau 4.10) que la solution 1 (amortissement  $\xi=0.3$ ) a la meilleure désirabilité. Quant aux solutions 3 et 4 qui présentent le même amortissement  $\xi=0.5$ , la solution 3 est plus performante que 4.

#### 4.9.2 Amélioration des performances

Dans ce paragraphe nous supposons que la désirabilité de la solution 1 n'est pas suffisante et nous voudrions améliorer la performance de cette solution. Pour cela une action sur les paramètres de contrôle est nécessaire. Quelle serait donc la bonne position des paramètres des stabilisateurs qui donnent la meilleure performance. Les facteurs de contrôle sont les paramètres  $K_{s1}$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $K_{s2}$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $K_{s3}$ ,  $a_3$ ,  $b_3$  des trois stabilisateurs. Si nous considérons 3 niveaux pour chaque paramètre nous avons  $3^9=729$  combinaisons possibles. Nous choisissons le tableau orthogonal  $OA_{27}(3^{13})$  (voir chapitre 3, page 68) pour réduire le nombre de combinaisons à 27. Nous affectons les 9 paramètres des stabilisateurs aux 9 premières colonnes du tableau  $OA_{27}(3^{13})$ .

Pour une variation de  $\pm 20\%$  des valeurs de contrôles de la solution 1 (amortissement

0.3) et  $\pm 30\%$  des facteurs bruit (tableau 4.9) nous obtenons les valeurs suivantes pour la désirabilité.

Tableau 4. 11: Désirabilité des 27 combinaisons du tableau orthogonal  $OA_{27}(3^{13})$

Cas	D	Cas	D	Cas	D
1	0.1644	10	0.6440	19	0.7701
2	0.3576	11	0.5176	20	0.6628
3	0.4570	12	0.3744	21	0.4726
4	0.2856	13	0.7310	22	0.4981
5	0.5631	14	0.2897	23	0.7191
6	0.4946	15	0.5854	24	0.5219
7	0.4489	16	0.5219	25	0.6329
8	0.4423	17	0.3785	26	0.8071
9	0.7533	18	0.6226	27	0.2585

D'après le tableau 4.11, la désirabilité est maximale pour la combinaison 26. Les paramètres des régulateurs correspondants à cette solution sont:

Tableau 4. 12: Paramètres des régulateurs qui maximisent la désirabilité.

Machines	Paramètres des régulateurs		
	Ks	a	b
1	37.3812	0.0371	0.3019
2	33.5376	0.0668	0.2798
3	13.9200	0.0204	0.5938

Les pôles du système pour les solutions (initiale et améliorée) sont présentés dans le tableau 4.13.

Tableau 4.13: Pôles de la solution initiale et la solution améliorée.

Pôles de la solution initiale	Pôles de la solution améliorée
-38.7569	-37.5170
-33.6515	-36.0253
-26.5095	-23.8145 + 4.0030i
-7.7212 + 16.2334i	-23.8145 - 4.0030i
-7.7212 - 16.2334i	-8.8383 + 15.5567i
-9.3001 + 11.0654i	-8.8383 - 15.5567i
-9.3001 - 11.0654i	-8.3257 + 13.4789i
-17.1863	-8.3257 - 13.4789i
-2.1484 + 7.7099i	-2.0418 + 7.5299i
-2.1484 - 7.7099i	-2.0418 - 7.5299i
-2.2715 + 6.7590i	-2.2042 + 7.1784i
-2.2715 - 6.7590i	-2.2042 - 7.1784i
<u>-1.1597 + 3.7627i</u>	-4.9798 + 4.3574i
<u>-1.1597 - 3.7627i</u>	-4.9798 - 4.3574i
-7.7234 + 1.8806i	<u>-1.4331 + 3.3924i</u>
-7.7234 - 1.8806i	<u>-1.4331 - 3.3924i</u>
-3.3509	<u>-1.2711</u>
<u>-1.2490</u>	-3.2650

Nous constatons (tableau 4.13) que la solution qui maximise la désirabilité améliore l'amortissement des pôles comme nous avons spécifié.

La vitesse des machines pour les deux solutions est montrée ci-dessous:

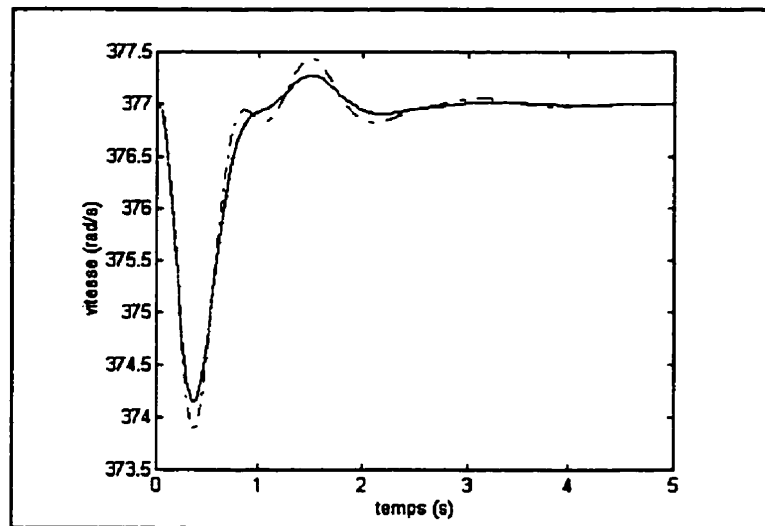


Figure 4.34: Vitesse de la machine 1.  
 (—): solution initiale (---): solution améliorée

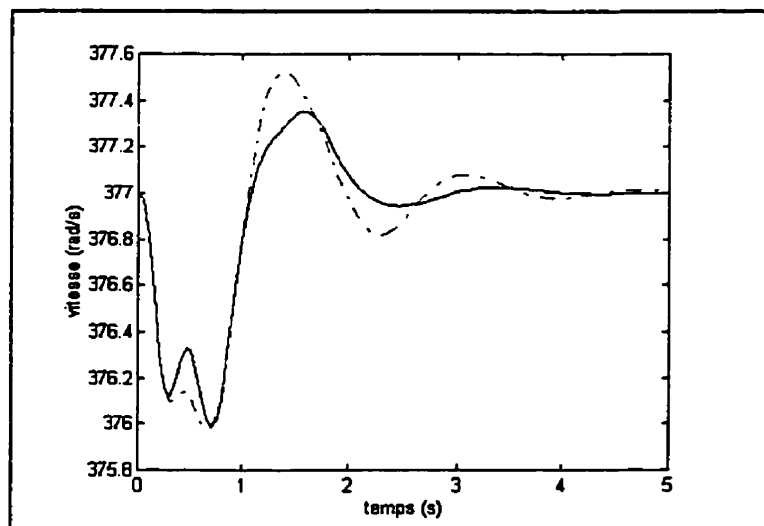


Figure 4.35: Vitesse de la machine 2  
 (—): solution initiale (---): solution améliorée

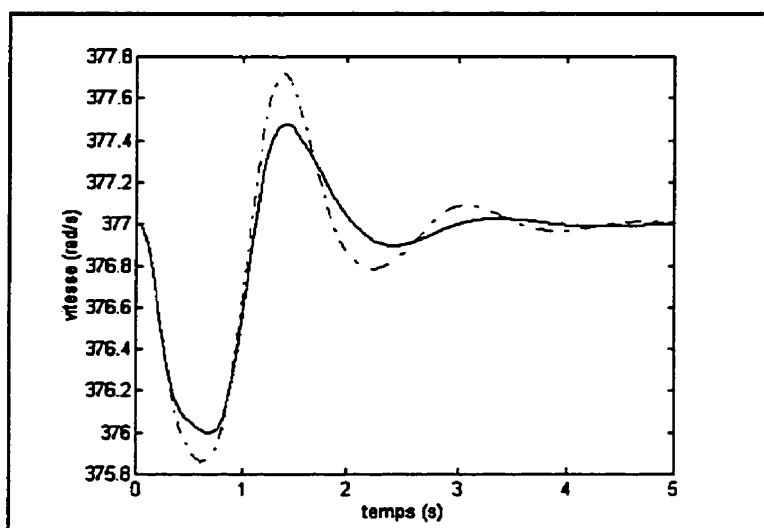


Figure 4.36: Vitesse de la machine 3.  
(—): solution initiale (---): solution améliorée

Remarque:

La représentation graphique de la désirabilité (figure 4.37) permet à l'utilisateur de visualiser l'état global de la performance pour les différentes combinaisons étudiées.

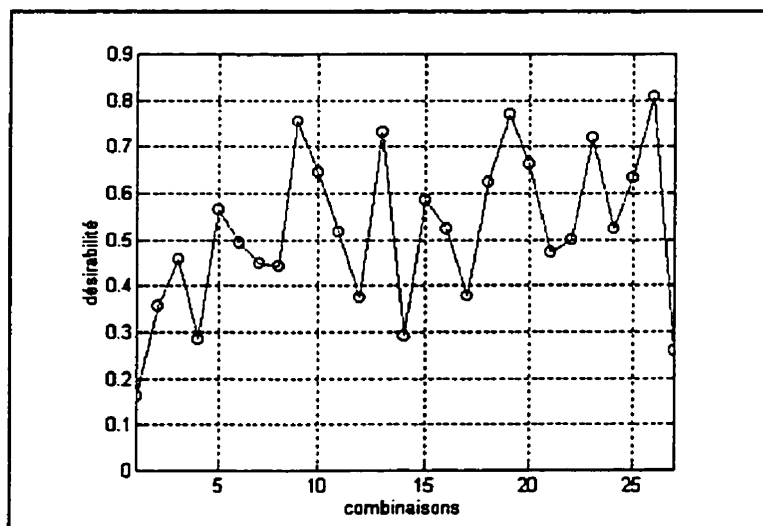


Figure 4.37: Désirabilité pour les 27 combinaisons  $OA_{27}(3^{13})$



## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Dans ce travail nous avons abordé les problèmes réels qui se posent dans la pratique des réseaux électriques. Les algorithmes utilisés actuellement dans l'exploitation des réseaux et en particulier ceux qui optimisent une certaine performance (algorithmes de répartition optimale de puissance ou algorithmes de conception des stabilisateurs) sont rapides et performants numériquement mais ils présentent des défaillances pratiques. La solution n'est pas toujours satisfaisante et les ajustements de la solution analytique à la solution pratique sont souvent requis. Un ajustement arbitraire des contrôles dégrade les performances recherchées par ces algorithmes et cause des violations de contraintes.

L'investigation que nous avons faite de ce problème de disparité entre la solution numérique et pratique nous a permis de relever un certain nombre de facteurs qui sont à l'origine de cette disparité:

- les exigences pratiques sont nombreuses et conflictuelles et la plupart des algorithmes sont mono-objectifs.

- les techniques d'optimisation sous contraintes utilisées ne permettent pas une certaine flexibilité dans la formulation des objectifs requise en pratique.

- les ajustements en pratique dépendent des valeurs mesurables prises par les grandeurs de réseau mais aussi des considérations liées à la pratique quotidienne, à l'expertise et au jugement de l'opérateur.

Ces constatations nous permettent de conclure que la solution du problème posé ne peut être purement analytique. Les techniques heuristiques ne présentent pas un grand

intérêt dans le réseau électrique à cause de leur exigence en temps de calcul. Laisser le problème à la discrétion de l'opérateur ce n'est pas réaliste.

Ce travail est une tentative de trouver une solution de compromis au problème avec l'approche qualitative pour assister l'opérateur dans ses prises de décision et lui permettre de faire ses ajustements de manière à assurer une bonne coordination entre les objectifs désirés.

Dans le domaine de la qualité, la méthode de Taguchi nous paraissait intéressante pour traiter ce problème à cause du lien scientifique établi entre la qualité et les paramètres d'un système d'une manière générale. La méthode consiste en une procédure systématique qui se résume en trois étapes:

1-identification du problème et spécification des performances désirées.

2-élaboration d'une matrice d'essais en utilisant les tableaux orthogonaux.

3-optimisation du problème.

Cependant Taguchi ne donne ni les justifications mathématiques de sa méthode ni les raisons qui l'ont amené à une formulation plus philosophique que scientifique de sa méthode. Le chapitre 2 consacré à cette méthode nous a demandé beaucoup d'investigation pour comprendre les idées de Taguchi. Nous rapportons au lecteur les fondements mathématiques et des exemples pour l'aider à comprendre cette mystérieuse approche. Notons que la contribution majeure de Taguchi c'est qu'il a su établir un lien scientifique matérialisé par sa fonction "pertes" entre la qualité et les paramètres d'un système. Ceci a permis de traiter le problème de la qualité par les outils mathématiques.

Cependant, la fonction "pertes" telle qu'elle est définie par Taguchi ne présente pas d'intérêt pour notre problème; C'est l'idée à la base de cette fonction qui nous a permis de trouver la fonction qui répond à notre application: la fonction de désirabilité.

La fonction de désirabilité joue le même rôle que la fonction pertes de Taguchi. Car la fonction "pertes" de Taguchi représente les pertes en argent lorsque la dimension d'un produit ne correspond pas à la valeur spécifiée, la fonction de désirabilité représente les ``pertes de satisfaction`` lorsqu'une grandeur du réseau n'a pas la valeur désirée.

Les deux fonctions nécessitent une certaine expertise pour leur élaboration et c'est l'objectif de ce travail: permettre à l'opérateur d'inclure son expertise dans l'optimisation du processus d'ajustement.

Les avantages de la fonction de désirabilité pour un opérateur de réseau sont:

- elle permet à l'opérateur de formuler ses besoins d'une manière flexible.
- sa forme quadratique permet d'approcher toutes les formes désirées pour une variable ou un rapport de variables.
- elle permet de renseigner directement sur les violations de contrainte par sa valeur nulle.
- définie sur l'intervalle  $[0, 1]$ , la fonction de désirabilité correspond, dans le cas stochastique, à la probabilité d'avoir la valeur désirée.
- permet une formulation multiobjective plus intéressante en pratique que la somme pondérée où le choix des coefficients de pondération est difficile.

La deuxième étape de la procédure consiste en l'élaboration d'une matrice d'essais en utilisant les tableaux orthogonaux. Construits à partir de la propriété d'orthogonalité des matrices pour une réduction optimale des grands nombres factoriels, les tableaux orthogonaux présentent, pour un opérateur de réseau électrique, les avantages suivants:

- modélisation simple des contrôles discrets et de bruit.
- analyse de sensibilité en présence des interactions entre les variables.
- alternative intéressante à l'analyse combinatoire.

Les tableaux orthogonaux est le deuxième outil important après la fonction de désirabilité rapportés ici et qui peuvent servir dans d'autres problèmes qui ne sont pas liés à la qualité.

Les tableaux orthogonaux de 2 ou 3 modalités peuvent être construits à partir de la méthode présentée au chapitre 2. Notons aussi que les catalogues et les logiciels PSE (planification statistique des essais) des tableaux orthogonaux existent.

Le choix d'un tableau orthogonal dépend des besoins d'application. Connaissant le nombre de facteurs d'entrée et les modalités de chaque facteur, nous choisissons le tableau orthogonal correspondant et nous affectons chaque colonne du tableau à un facteur.

Nous avons montré dans les différents exemples de cette thèse comment utiliser les tableaux orthogonaux pour représenter les contrôles discrets, analyser la sensibilité de la solution aux variations statistiques des paramètres et déterminer les interactions entre les variables. Le lecteur peut se servir de ces exemples pour ses applications.

La troisième étape de la procédure est la phase des essais ou de simulation. Le temps

de simulation dépend du nombre d'essais à effectuer et de la dimension du réseau. Les tableaux ci-dessous donnent le nombre d'essais en fonction du nombre de paramètres pour 2 et 3 modalités requis par les tableaux orthogonaux et l'analyse combinatoire.

**Tableau C1: Nombre d'essais pour les facteurs à deux modalités**  
**TO: tableaux orthogonaux**  
**AC: analyse combinatoire**

Facteurs	nombres d'essais	
	TO	AC
3	4	4
7	8	128
15	16	32,768
31	32	-
63	64	-
127	128	-

**Tableau C2: Nombre d'essais pour les facteurs à trois modalités**  
**TO : tableaux orthogonaux**  
**AC: analyse combinatoire**

Facteurs	nombres d'essais	
	TO	AC
4	9	81
13	27	1,594,323
40	81	-
121	243	-

Nous constatons (d'après C1 et C2) que les tableaux orthogonaux apportent une simplification importante de nombre d'essais par rapport à l'analyse combinatoire.

Pour un réseaux de grande dimension où le nombre de contrôles et les paramètres considéré est élevé, la procédure devient exigeante en temps de simulation. Cependant

l'intérêt pratique d'utiliser tous les contrôles et les paramètres d'un réseau pour analyser les performances d'une solution avec la procédure proposée nous paraît non justifiable pour les raisons suivantes:

- la procédure est pour le contrôle et non la résolution.
- le domaine de son application est post-optimal.
- certains réglages et actions sur les contrôles sont triviaux.
- les contrôles ne peuvent être manoeuvrés tous en pratique.
- l'analyse des résultats, importante pour la maîtrise du système par l'opérateur, ne doit pas être complexe.

Vues ces considération, nous pensons qu'il est plus intéressant de se limiter aux facteurs principaux qui ont un impact important sur la performance de la solution au lieu d'utiliser un grand nombre de facteurs qui exige un temps de calcul élevé et rend les résultats complexes, et l'impact de chaque facteur sur la performance difficile à déterminer. Nous résumons ci dessous les avantages et les limitation de la procédure:

L'avantage de la procédure réside dans sa simplicité et les possibilités pratiques offertes à l'utilisateur. La procédure permet à l'exploitant de:

- formuler ses besoins d'une manière flexible et sans contraintes au moyen de la fonction de désirabilité.
- choisir les facteurs à étudier et les fixer aux niveaux voulus au moyen des tableaux orthogonaux. Ceci remédie au problème des éléments discrets et intègre l'expertise de l'utilisateur dans le processus d'optimisation.

-analyser la sensibilité incluant les interactions et les variations incontrôlables des paramètres.

-coordonner l'ensemble des objectifs au moyen de la désirabilité globale.

-sélectionner la solution pratique en utilisant le rapport signal/bruit.

-visualiser l'état global des performances en représentant graphiquement la désirabilité globale.

-tester les algorithmes d'optimisation pour leur fiabilité dans la recherche de la solution optimale.

Les limitations de la procédure se résument ainsi:

-le temps de calcul élevé intrinsèque aux techniques non analytiques.

-l'expertise et la connaissance du système sont requises.

-procédure post-optimale.

En analysant les avantages et les inconvénients de la procédure nous pensons que l'application de la procédure en post-optimalité avec les algorithmes d'optimisation des réseaux électriques est intéressante. Car, en traitant les problèmes complexes de la pratique (variations incontrôlables des paramètres, éléments discrets, interactions entre les facteurs) par la procédure proposée nous sauvegardons la rapidité des algorithmes d'optimisation et nous améliorons la performance de la solution pour qu'elle soit acceptable en pratique. C'est une alternative aux algorithmes d'optimisation utilisant les techniques stochastiques et combinatoires qui sont complexes et ils présentent moins d'intérêt dans l'exploitation réelle des réseaux électriques.

## BIBLIOGRAPHIE

- [01] Abdalla O. H., Hassan S. A., Tweig N. T., "Coordinated Stabilization of Multimachine Power System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 103, No. 3, March 1984.
- [02] American Supplier Institute (1984,1985,...1989), Proceedings the ASI Symposia on Taguchi's Methods. American Supplier Institute, Dearborn, MI.
- [03] Åström K. J. "Self-Tuning Controllers Based on Pole-Placement," Proceedings of IEE, Vol. 127, Pt. D, No. 3, May 1980.
- [04] Åström K. J., "Theory and Applications of Adaptive Control-A Survey," Automatica, Vol. 19, No. 5, September 1983.
- [05] Blanchon G., Bonnans J. F., Dodu J. C., "Application d'une Méthode de Programmation Quadratique Successive à l'Optimisation des Puissances dans les Réseaux Electriques de Grande Taille", Bulletin Electricité de France, serie C, No. 2, 1991.
- [06] Bounou M., Lefebvre S., Malhamé R., "A Spectral Algorithm for Extracting Power System Modes From Time Recordings", IEEE Transactions on Power Systems, June 1991.
- [07] Bounou M., Lefebvre S., Do X-Dai, "A Quality Optimal Power Flow By Taguchi Method", Conférence Canadienne de Génie Électrique, Toronto, Septembre 1992.
- [08] Bounou M., Lefebvre S., Do X-Dai, "Improving the Quality of An Optimal Power Flow Solution by Taguchi Method", International Journal of Electrical Power



& Energy Systems, Vol. 17, No. 2, 1995.

- [09] Brayton R. K, Hachtel G. D, Sangiovanni-Vincentelli A. L, "A Survey of Optimization Techniques for I-C Design", Proceedings of IEEE, Vol. 69, No.10, October, 1981.
- [10] Bose R. C., Manvel B. Introduction to Combinatorial Theory. John Wiley & Sons, 1984.
- [11] Bose R. C., "Orthogonal Arrays of Strength Two and Three", Annals of Mathematical Statistics, No. 23, 1952.
- [12] Burchett R. C., Heydt G. T., "Probabilistic Methods for Power System Dynamic Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-97, 1978.
- [13] Carpentier J., "Contribution à l'Etude du Dispatching Economique," Bulletin de la Société Française des Electriciens, Vol.3, Aug. 1962.
- [14] Chen Z. J., Cook A., "Robustness of Model-Reference Adaptive Control Systems with Unmodelled Dynamics," International Journal of Control, Vol.39, No.1, Jan. 1984.
- [15] Christensen G. S., El-Hawary M. E., Soliman. Optimal Control Applications in Electric Power Systems. Plenum Press, New York, 1987.
- [16] Clément B., "Méthode Taguchi", Qualité Totale, Automne 1992.
- [17] Davison G. R., "Dividing Load between Units", Electrical World, No.23, December 1922.
- [18] Dehnad K., Quality Control, Robust Design, and Taguchi Method. Wadsworth,

Pacific Grove, California 1989.

- [19] deMello F. P., Concordia C., "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Transactions on Power Systems, April 1969.
- [20] deMello F. P., Nolan P. J., Laskowski T. P., Undrill J. M., "Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 99, No.3, May 1980.
- [21] Dommel H. W., Tinney W. T., "Optimal Power Flow Solutions", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 87, No. 10, October 1968.
- [22] Derringer G., Suich R., "Simultaneous Optimization of Several Variables", Journal of Quality Technology, Vol. 12, No. 4, October 1980.
- [23] Draper N. R., "Ridge Analysis of response Surface", Technometrics, Vol. 5, No. 4, November 1963.
- [24] Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A., "State Space Solutions to Standard  $H_2$  and  $H_\infty$  Control Problems," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 34, No. 8, August 1989.
- [25] El-Hawary M. E., Mbamalu G. A. N., " A Comparison of Probabilistic Perturbation and Deterministic Based Optimal Power Flow Solutions", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No.3, August 1991.
- [26] El-Kady M. A., Bell B. D., Carvalho V. F., Burchett R. C., Happ H, D. R., Vierath, "Assessment of Real-Time Optimal Voltage Control", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, No.2, May 1986.

- [27] Fleming P. J., Fonseca C. M., "Multiobjective Optimal Controller Design With Genetic Algorithms", IEE Control, March 1994.
- [28] Fleming R. J., Mohan M. A., Parvatisam K., "Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 100, No. 5, May 1981.
- [29] Fouad A. A., Anderson P. M., Power System Control and Stability. The IOWA State University Press (1977).
- [30] Francis B. A., Doyle J. C., "Linear Control Theory With an H Optimally Criterion," SIAM Journal Control & Optimization, Vol. 25, 1987.
- [31] Geoffrey Vining G. G., Myers R. H., "Combining Taguchi and Response Surface Philosophies: A Dual Response Approach", Journal of Quality Technology, Vol. 22, No. 1, January 1990.
- [32] Hall M., Combinatorial Theory. Blaisdell Publishing Company, 1967.
- [33] Hunter J. S., "Statistical Design Applied to Product Design", Journal of Quality Technology, Vol. 17, No. 4, October 1985.
- [34] Happ H. H., "Optimal Power Dispatch - A Comprehensive Survey", IEEE Transactions on Power Systems, No. 3, PAS-96, May 1977.
- [35] Harrington C. E., "The desirability function", Journal of Industrial Quality Control, Vol. 21, No. 10, 1965.
- [36] Hong Y-Y., Liu C-C., "A Heuristic and Algorithmic Approach to VAR Planning", IEEE Transactions on Power Systems, May 1991.

- [37] Huneault M., Galiana F. D., "A Survey of The OPF Literature", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.6, No.2, May 1991.
- [38] Kacker R. N., Lagergren E. S., Filliben J. J., "Taguchi's Fixed-Element Arrays are Fractional Factorials", Journal of Quality Technology, Vol. 23, No. 2, April 1991.
- [39] Kahn H. W., Tucker A. W., "Nonlinear Programming", Proceeding of 2nd Berkeley Symposium on Math. Stat. and Prob., Berkely, 1951.
- [40] Kanniah J., Malik O. P., Hope G. S., "Power System Stabilizer Based on Adaptive Control Techniques", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.103, No. 8, August 1984.
- [41] Kimbark E. W., Power System Stability. Vol.3, John Willey & Son, 1955.
- [42] Kimura H., Lu Y., Kawatani R., "On the structure of  $H_\infty$  Control Systems and Related Extensions," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 36, No. 6, June 1991.
- [43] Lebow W. M., Rouhani R., Nadira R., Usoro P. B., Mehra R. K., Sobieski D. W., Pal M. K., Bhavaraju M. P., "A Hierarchical Approach to Reactive VoltAmpere (VAR) Optimization in System Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 104, No. 8, August 1985.
- [44] Lefebvre S., "Tuning Of stabilizers in Multimachine Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 102, No. 2, February 1983.
- [45] Leon R. C., Shoemaker A. C., Kaker R. N., "Performance measures independent

of adjustment: An Explanation and Extension of Taguchi's Signal-To-Noise Ratios", Technometrics, Vol. 29, No. 3 1987.

- [46] Liu W-H., Papalexopoulos A.D., Tinney W.F., "Discrete Shunt Controls in a Newton Optimal Power Flow", IEEE Transactions on Power Systems, January 1991.
- [47] Meyn S. P., Brown L. J., "Model Reference Adaptive Control of Time Varying and Stochastic Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 38, No. 12, December 1993.
- [48] Myers R. H., Carter W. H., "Response Surface Techniques for Dual Response Systems", Technometrics, Vol. 15, No. 2, May 1973.
- [49] Pereira M.V.F., Maceira M. E. P., Oliveira G. C., Pinto L. M. G. V., "Combining Analytical Models and Monte-Carlo Techniques in Probabilistic Power System Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, June 1991.
- [50] Pierre D. A., "A Perspective on Adaptive Control of Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 2, No. 2, May 1987.
- [51] Pignatiello J. J., "An Overview of the Strategy and Tactics of Taguchi", Transactions IE, Vol. 20, No. 3, September 1988.
- [52] Roy K. R. A Primer On The Taguchi Method. Manufacturing Competitive series, Van Nostrand Reinhold, New York 1990.
- [53] Ross P. J., Taguchi Techniques for Quality Engineering. McGraw-Hill 1988.
- [54] Sasson A. M., Merrill H. M. "Some Applications of Optimizations Techniques to Power System Problems", Proceedings of IEEE, Vol. 62, No. 7, 1974.

- [55] Seaman C. M., Desrochers A. A., List G. F., "A Multiobjective Optimization Approach to Quality Control with Application to Plastic Injection Molding", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 2, April 1993.
- [56] Stahl E. C. M., Economic Loading of generating Stations. Electrical Engineering, September, 1931.
- [57] Steinberg M. J., Smith T. H., "The Theory of Incremental Rates", Electrical Engineering, March, 1934.
- [58] Stott B., Alsac O., Monticelli A. J., "Security Analysis and Optimization", Proceedings of IEEE, Vol.75, No.12, December 1987.
- [59] Taguchi G., Introduction to Quality Engineering. Asian Productivity Organization, Tokyo 1986.
- [60] Tahk M., Speyer J. L., "Modeling of Parameter Variations and Asymptotic LQG Synthesis," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 32, No. 9, August 1987.
- [61] Tinney W. F., "Some Deficiencies in Optimal Power Flow" PICA, Montréal, 1987.
- [62] Venkatesh S.V., Liu W-H. E., Papalexopoulos A. D., "A Least Squares Solution for Optimal Power Flow Sensitivity Calculation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, August 1992.
- [63] Viviani G. L., Heydt G. T., "Stochastic Optimal Energy Dispatch", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 100, No. 7, July 1981.
- [64] Young D. L., Teplik J., Weed H. D., Trancht N. T., Alvarez A. R., "Application

of Statistical Design and Response Surface Methods to Computer-Aided VLSI Device Design II: Desirability Functions and Taguchi Methods", IEEE Transactions on CAD, Vol. 10, No.1, January 1991.

- [65] Yu Y., Electric Power System Dynamics. Academic Press, New York 1983.

## ANNEXE A

### Données du réseau IEEE-30 noeuds[Christensen 1987]

**Tableau A1: Impédances et admittances des lignes**

Ligne	Noeud départ, arrivée	Impédance (R, X)	Admittance (G, B)
1	1, 2	(0.0192, 0.0575)	(0.00, 0.0264)
2	1, 3	(0.0452, 0.1352)	(0.00, 0.0204)
3	2, 4	(0.0570, 0.1737)	(0.00, 0.0184)
4	3, 4	(0.0132, 0.0379)	(0.00, 0.0042)
5	2, 5	(0.0472, 0.1983)	(0.00, 0.0209)
6	2, 6	(0.0581, 0.1763)	(0.00, 0.0188)
7	4, 6	(0.0119, 0.0414)	(0.00, 0.0045)
8	5, 7	(0.0460, 0.1160)	(0.00, 0.0102)
9	6, 7	(0.0267, 0.0820)	(0.00, 0.0085)
10	6, 8	(0.0120, 0.0420)	(0.00, 0.0045)
11	6, 9	(0.0000, 0.2126)	(0.00, 0.00)
12	6, 10	(0.0000, 0.5734)	(0.00, 0.00)
13	9, 11	(0.0000, 0.2080)	(0.00, 0.00)
14	9, 10	(0.0000, 0.1100)	(0.00, 0.00)
15	4, 12	(0.0000, 0.2747)	(0.00, 0.00)
16	12, 13	(0.0000, 0.1400)	(0.00, 0.00)
17	12, 14	(0.1231, 0.2559)	(0.00, 0.00)
18	12, 15	(0.0662, 0.1304)	(0.00, 0.00)
19	12, 16	(0.0945, 0.1987)	(0.00, 0.00)
20	14, 15	(0.2210, 0.1997)	(0.00, 0.00)
21	16, 17	(0.0824, 0.1923)	(0.00, 0.00)
22	15, 18	(0.1073, 0.2185)	(0.00, 0.00)
23	18, 19	(0.0639, 0.1292)	(0.00, 0.00)
24	19, 20	(0.0340, 0.0680)	(0.00, 0.00)
25	10, 20	(0.0936, 0.2090)	(0.00, 0.00)
26	10, 17	(0.0324, 0.0845)	(0.00, 0.00)
27	10, 21	(0.0348, 0.0749)	(0.00, 0.00)
28	10, 22	(0.0728, 0.1499)	(0.00, 0.00)
29	21, 22	(0.0116, 0.0236)	(0.00, 0.00)
30	15, 23	(0.1000, 0.2020)	(0.00, 0.00)
31	22, 24	(0.1150, 0.1790)	(0.00, 0.00)
32	23, 24	(0.1320, 0.2700)	(0.00, 0.00)
33	24, 25	(0.1885, 0.3292)	(0.00, 0.00)
34	25, 26	(0.2544, 0.3800)	(0.00, 0.00)
35	25, 27	(0.1093, 0.2087)	(0.00, 0.00)
36	28, 27	(0.0000, 0.4090)	(0.00, 0.00)
37	27, 29	(0.2198, 0.4153)	(0.00, 0.00)
38	27, 30	(0.3202, 0.6027)	(0.00, 0.00)
39	29, 30	(0.2399, 0.4533)	(0.00, 0.00)
40	8, 28	(0.0636, 0.2000)	(0.00, 0.0214)
41	6, 28	(0.0169, 0.0599)	(0.00, 0.0065)



Tableau A2: Puissances actives et réactives des charges en MVA

Noeud	P	Q	Noeud	P	Q	Noeud	P	Q
1	0.0	0.0	11	00.0	0.0	21	17.5	11.2
2	21.7	12.7	12	00.0	0.0	22	0.0	0.0
3	2.4	1.2	13	11.0	7.5	23	3.2	1.6
4	7.6	1.6	14	6.2	1.6	24	8.7	6.7
5	94.2	19.0	15	8.2	2.5	25	0.0	0.0
6	0.0	0.0	16	3.5	1.8	26	3.5	2.3
7	22.3	10.9	17	9.0	5.8	27	0.0	0.0
8	30.0	30.0	18	3.2	0.9	28	0.0	0.0
9	0.0	0.0	19	9.5	3.4	29	2.4	0.9
10	5.8	2.0	20	2.2	0.7	30	10.5	1.9

Tableau A3: Tensions et puissances des générateurs

Noeud	Tension (pu)	Pg (MW)	Qg (Mvars)
1	(1.0,0.0)	97.580	9.367
2	1.010	93.626	-1.849
5	1.082	00.000	31.970
11	1.071	00.000	30.000
13	1.043	101.911	49.627

## ANNEXE B

### Données du réseau 23-noeuds[El-Hawary 1991]

Tableau B1: Puissances actives et réactives des charges

Noeud	P (MW)	Q (Mvars)
1	0.0	00.0
2	90.0	25.0
3	52.0	16.0
4	50.0	12.0
5	48.0	13.0
6	40.0	10.0
7	46.0	12.0
8	02.0	00.0
9	130.0	38.0
10	180.0	44.0
11	134.0	32.0
12	04.0	00.0
13	4.5	00.0
14	460.0	120.0
15	200.0	50.0
16	142.0	33.0
17	304.0	86.0
18	110.0	26.0
19	380.0	94.0
20	80.0	-25.0
21	370.0	94.0
22	201.0	-52.0
23	130.0	32.0

Tableau B2: Tensions

Noeud	module (pu)	Phase (rad)
1	1.060	0.00
2	0.986	-0.33
3	1.015	-0.09
4	0.983	-0.20
5	0.981	-0.39
6	0.985	-0.30
7	0.966	-0.39
8	1.000	-0.40
9	0.974	-0.38
10	0.979	-0.30
11	1.047	-0.15
12	1.044	-0.48
13	1.056	-0.42
14	1.090	-0.38
15	1.038	-0.63
16	1.041	-0.64
17	1.039	-0.67
18	1.055	-0.71
19	1.060	-0.73
20	<u>1.112</u>	-0.68
21	1.084	-0.73
22	1.076	-0.74
23	1.056	-0.54

Tableau B3: Impédances et admittances des lignes

Ligne	Noeuds départ    arrivée		Impédance (R, X)	Admittance (G, B)
1	1	3	(0.0242,0.0540)	(0.00,0.0118)
2	1	4	(0.0309,0.0693)	(0.00,0.0151)
3	2	5	(0.0404,0.0888)	(0.00,0.0197)
4	8	5	(0.0325,0.0709)	(0.00,0.0157)
5	2	7	(0.0615,0.1620)	(0.00,0.0342)
6	3	6	(0.0576,0.1520)	(0.00,0.0320)
7	4	9	(0.0266,0.0700)	(0.00,0.0148)
8	9	7	(0.0229,0.0504)	(0.00,0.0112)
9	8	6	(0.0446,0.1003)	(0.00,0.0218)
10	11	10	(0.0233,0.0514)	(0.00,0.0456)
11	8	10	(0.0597,0.1315)	(0.00,0.0291)
12	9	10	(0.0597,0.1315)	(0.00,0.0291)
13	13	14	(0.0043,0.0351)	(0.00,0.2373)
14	14	12	(0.0043,0.0351)	(0.00,0.2373)
15	15	12	(0.0038,0.0307)	(0.00,0.2078)
16	18	15	(0.0035,0.0288)	(0.00,0.1951)
17	23	13	(0.0089,0.0720)	(0.00,0.4871)
18	16	17	(0.0010,0.0080)	(0.00,0.0543)
19	17	18	(0.0021,0.0167)	(0.00,0.1133)
20	19	18	(0.0016,0.0127)	(0.00,0.0862)
21	20	19	(0.0045,0.0362)	(0.00,0.2451)
22	22	18	(0.0024,0.0192)	(0.00,0.1298)
23	20	21	(0.0019,0.0156)	(0.00,0.1056)
24	21	22	(0.0014,0.0114)	(0.00,0.0770)
25	23	16	(0.0020,0.0164)	(0.00,0.1109)
26	12	8	(0.0023,0.0839)	(0.00,0.0000)
27	13	8	(0.0023,0.0839)	(0.00,0.0000)
28	12	9	(0.0185,0.1300)	(0.00,0.0000)
29	13	9	(0.0023,0.0839)	(0.00,0.0000)
30	1	2	(0.0025,0.2000)	(0.00,0.0000)

Tableau B4: Tensions et puissances des générateurs

Noeud	Tension (pu)	Pg (MW)	Qg (Mvars)
1	1.060	660.7	89.27
11	1.047	440.5	-13.70
14	1.090	931.9	32.09
20	1.087	659.6	220.00
23	1.056	593.3	-16.30

## ANNEXE C

### Données du réseau de trois machines[Lefebvre 1983]

Tableau C1: Données des machines

Machine	$X_d$	$X_q$	$X'_d$	$T'_{do}$	$H$	$K_a$	$T_a$	$T_2$	$T_4$
1	1.68	1.66	0.32	4.0	2.31	40	0.05	0.05	0.05
2	0.88	0.53	0.33	8.0	3.40	45	0.05	0.05	0.05
3	1.02	0.57	0.20	7.76	4.63	50	0.05	0.05	0.05

Tableau C2: Tensions et puissances initiales

Noeud	$P_0$ (MW)	$Q_0$ (MVA)	$V_0$ (pu)	$\delta_0$ (deg)
1	26.5	37.0	1.03	10.0
2	518	-31.5	1.025	32.52
3	1582	-49.9	1.03	45.82
4	410	49.1	1.06	20.69

Tableau C3: Impédances des lignes

Noeuds départ arrivée		Impédance
1	4	$0.1782 + j0.7998$
1	3	$0.1293 + j0.7169$
1	2	$0.0923 + j0.5313$
2	4	$0.0666 + j0.3513$
3	4	$0.0926 + j0.6508$
2	3	$0.0628 + j0.4745$

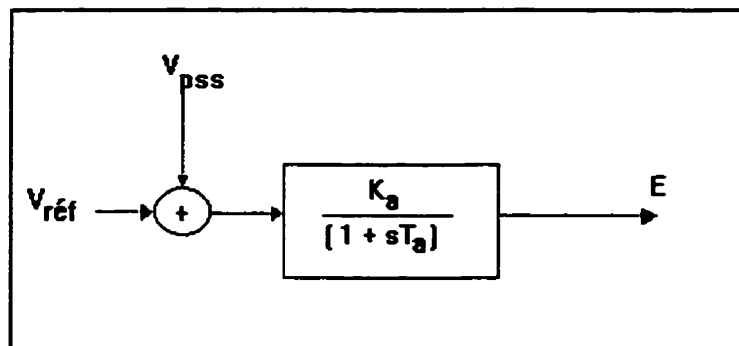


Figure C1: Excitation des machines

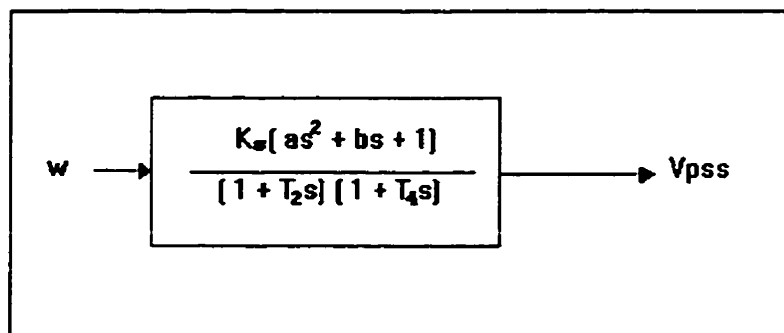
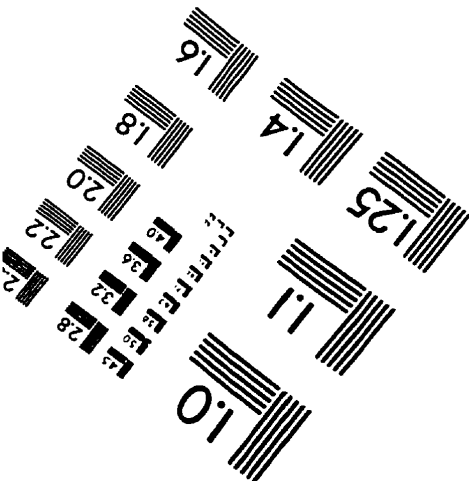
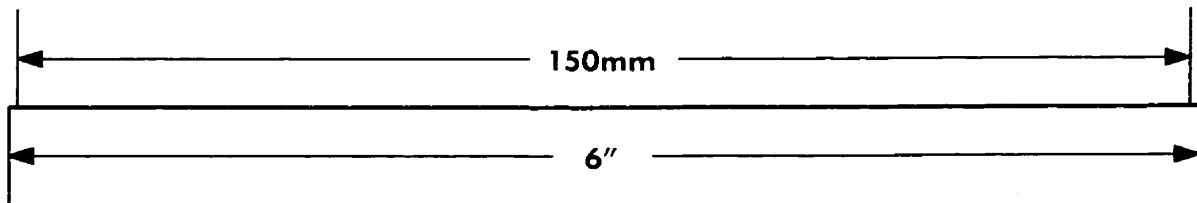
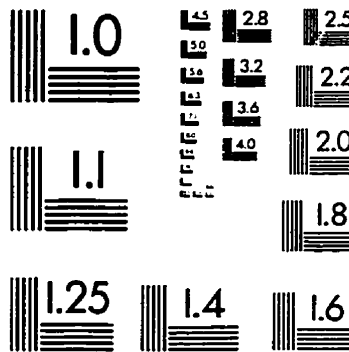
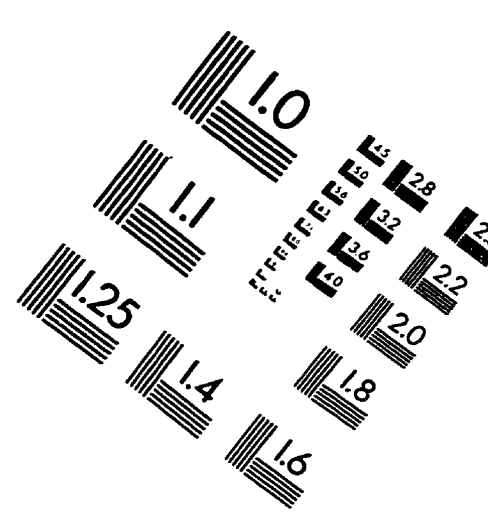
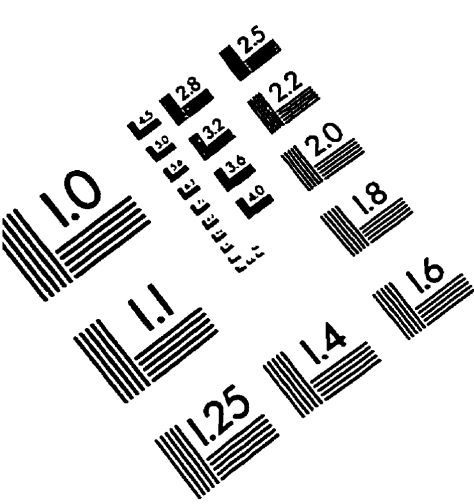


Figure C2: Stabilisateur

# IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc  
1653 East Main Street  
Rochester, NY 14609 USA  
Phone: 716/482-0300  
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

